

Sisäkuuluvuuden varmistaminen rakennushankkeessa

Lauri Ikola

Sähkötekniikan korkeakoulu

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi
diplomi-insinöörin tutkintoa varten Espoossa 27.4.2020.

Työn valvoja

Prof. Jaakko Ketomäki

Työn ohjaaja

Prof. Jaakko Ketomäki

Tiivistelmä

AALTO-YLIOPISTO
SÄHKÖTEKNIIKAN KORKEAKOULU

DIPLOMITYÖN
TIIVISTELMÄ

Tekijä: Lauri Ikola

Työn nimi: Sisäkuuluvuuden varmistaminen rakennushankkeessa

Päivämäärä: 27.04.2020

Kieli: Suomi

Sivumäärä: 63+1

Sähkötekniikan ja automaation laitos

Professuuri: Älykkäiden rakennusten teknologiat ja palvelut

Koodi: EEA

Valvoja: Prof. Jaakko Ketomäki

Ohjaaja: Prof. Jaakko Ketomäki

Matkaviestinverkon kuuluvuuteen rakennusten sisätiloissa, eli sisäkuuluvuuteen vaikuttavat tekijät ovat yleisellä tasolla hyvin tiedossa. Radiosignaalien ominaisuuksia on tutkittu paljon ja ne tunnetaan hyvin, mutta kuitenkin sisäkuuluvuusongelmia esiintyy edelleen rakennushankkeiden yhteydessä. Sisäkuuluvuusongelmien nähdään yleistyneen entistä korkeampien taajuusalueiden käyttöönoton sekä tiukentuneiden energiatehokkuusvaatimusten ja matalaenergiarakentamisen myötä. Lähitulevaisuudessa sisäkuuluvuusongelmien ei odoteta ainakaan vähentyvän 5G-verkkojen yleistymisen ja Virve 2.0:n käyttöönoton myötä. Niin ikään rakennusten energiatehokkuusvaatimukset tulevat todennäköisesti vain kiristymään lähitulevaisuudessa.

Tässä diplomityössä tarkastellaan sisäkuuluvuutta osana rakennushanketta. Työssä kartoitetaan sisäkuuluvuusongelmiin mahdollisia syitä ja ratkaisuja sekä rakennushankkeen eri osapuolten näkemyksiä sisäkuuluvuuden varmistamiseksi. Työssä tarkastellaan myös sähkösuunnittelijan toimintaedellytyksiä sisäkuuluvuushankkeissa ja pyritään selvittämään sähköalalla vallitsevaa yhteistä näkemystä sisäkuuluvuusongelmiin. Työtä varten valittiin tutkimusmenetelmäksi kvalitatiivinen haastattelututkimus, jolla selvitettiin rakennushankkeen eri osapuolten näkemyksiä sekä kokemuseräistä tietoa liittyen rakennusten sisäkuuluvuuteen ja rakennushankkeisiin.

Haastatteluiden perusteella havaittiin sisäkuuluvuuden osalta useita ongelmakohtia ja riskejä. Tärkeitä keskustelunaiheita haastatteluissa olivat vastuukysymykset liittyen hankkeiden tehtävänjakoon, rakennusten käyttäjien ja viranomaisten turvallisuus, rakennushankkeen eteneminen sekä sähkösuunnittelijan toimintaedellytykset. Haastattelututkimuksen perusteella alalle tarvitaan lisää ohjeistusta ja yhdessä sovittuja käytäntöjä sisäkuuluvuuden varmistamiseksi. Työssä tehtyjen johtopäätösten perusteella tulisi myös sähkösuunnittelijoiden osaamista kehittää radiotekniikan ja sisäverkkojen osalta, alkaen alan koulutusohjelmista, joissa yleisesti tietoteknisiä järjestelmiä käsitellään liian vähän.

Avainsanat: Sisäkuuluvuus, rakennushanke, kuuluvuusongelmat, sisäantenniverkko, 5G-verkko, viranomaisradioverkko

Tiivistelmä (englanniksi)

AALTO UNIVERSITY
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING

ABSTRACT OF THE
MASTER'S THESIS

Author: Lauri Ikola

Title: Ensuring In-building Mobile Coverage in Construction Project

Date: 27.04.2020

Language: Finnish

Number of pages: 63+1

Department of Electrical Engineering and Automation

Professorship: Smart Building Technologies and Services

Code: EEA

Supervisor: Prof. Jaakko Ketomäki

Advisor: Prof. Jaakko Ketomäki

Many factors are known to affect the quality of mobile coverage within built structures; radio signal properties and propagation in particular, have been researched extensively. However, so-called in-building coverage problems may still occur as result of construction projects, and they have also become more frequent as a result of relatively high frequency bands and tight energy performance requirements. Currently, after the introduction of commercial 5G networks and the new version of the public safety network (Virve 2.0), in-building coverage problems are not expected to decrease. Moreover, energy performance requirements are only expected to tighten in the near future.

This thesis studies in-building coverage as a part of construction projects. The purpose of this thesis is to identify potential problems, solutions and perspectives of different stakeholders in a construction project. Furthermore, this thesis assesses the operational preconditions for electrical engineers, and possible areas of expert consensus in the industry, regarding the in-building coverage in construction projects. These objectives are achieved through a qualitative interview study. This experimental approach was chosen in order to take the current operating environment into account and to gather experiential knowledge from professionals in different positions working with in-building coverage problems.

Based on the interviews, there was evidence of various problems and risks regarding in-building coverage. For example, transparency of delegation of responsibility, the safety of all building users, especially first responders, and the progress of the project itself were important topics of discussion during the interviews. Furthermore, the interviewees argued that currently operational preconditions and the competence of electrical engineers require improvements. Therefore, the industry needs to establish a comprehensive code of practice and common guidelines in cooperation to ensure adequate in-building mobile coverage in construction projects. Additionally, the competence of electrical engineers regarding radio technology and in-building networks should be developed by updating educational provision resources, and information and communication systems syllabuses in general.

Keywords: In-building coverage, construction project, coverage problems, distributed antenna system, 5G network, public safety network

Esipuhe

Tämä diplomityö on kirjoitettu talvella lukuvuotena 2019–2020 osana diplomi-insinöörin tutkintoa Aalto-yliopistolla, Insinööritoimisto Staconin toimeksiannosta.

Vuoden 2019 aikana ensimmäiset kaupalliset 5G-verkot avautuivat myös kuluttajille. Tämän myötä julkisuudessa on käyty monenlaista keskustelua uusimman sukupolven mobiiliverkosta eri näkökulmista. Alun perin työ lähtikin työpaikalla liikkeelle työnimellä ”5G ja sisäkuuluvuus”, mutta pian laajentui käsittelemään yleisesti sisäkuuluvuutta rakennushankkeessa, sillä sisäkuuluvuutta halutiin käsitellä myös etenkin viranomaisradioverkon osalta.

Diplomityön myötä avautui hyvä mahdollisuus perehtyä tarkemmin sisäkuuluvuuteen ja siihen liittyvään tekniikkaan, sillä allekirjoittaneella ei ole takanaan ollenkaan opintoja radiotekniikasta. Radiotekniikan puute sähköisen talotekniikan insinöörin (AMK) ja diplomi-insinöörin opinnoissa nähdään lopulta myös osana tämän diplomityön johtopäätöksiä.

Erityisen suuret kiitokset haluan osoittaa varatoimitusjohtaja Jonne Järviselle työn konkreettisesta ohjaamisesta sekä jatkuvasta kiinnostuksesta, kritiikistä ja kannustuksesta. Häneltä tulivat tärkeimmät ohjeet ja kommentit liittyen työn sisältöön. Lisäksi hän oli oleellisesti tukena haastatteluiden järjestämisessä ja analysoinnissa. Haluan lisäksi kiittää myös koko Staconin henkilökuntaa hyvästä työilmapiiristä ja mielenkiintoisista keskusteluista diplomityön tiimoilta.

Haluan kiittää myös työn valvojaa, professori Jaakko Ketomäkeä tärkeistä neuvoista työn saattamiseksi vastaamaan vaatimuksiltaan ja ulkoasultaan diplomityötä.

Kiitos myös jokaiselle, joka antoi arvokasta aikaansa lupautuen haastateltavaksi diplomityötä varten. Ilman teitä tätä työtä ei olisi ollut mahdollista tehdä.

Lopuksi haluan kiittää perhettäni ja lähimmäisiäni tuesta ja kannustuksesta kaikkien opintojeni osalta. Te olette jaksaneet seurata pitkää taivaltani tähän pisteeseen asti, kiitos siitä. Nyt kun työ on valmis, voidaan katse nostaa jälleen ja suunnata kauas horisonttiin.

Otaniemi, 27.4.2020

Lauri Ikola

Sisällys

Tiivistelmä	2
Tiivistelmä (englanniksi)	3
Esipuhe.....	4
Sisällys	5
Lyhenteet	7
1. Johdanto	9
2. Matkaviestinverkot	11
2.1 Matkaviestinverkot Suomessa.....	11
2.2 Viranomaisradioverkko.....	14
3. Sisäkuuluvuusongelmat	16
3.1 Lainsäädäntö	16
3.2 Rakennusten energiatehokkuusvaatimukset.....	17
3.3 Matkaviestinverkon ominaisuudet	18
3.4 Materiaaliominaisuudet.....	19
4. Sisäkuuluvuuden toteutusvaihtoehdot	22
4.1 Rakennustekniset ratkaisut.....	22
4.1.1 Materiaalivalinnat.....	22
4.1.2 RF-aukko	23
4.2 Teletekniset ratkaisut	24
4.2.1 Operaattorilähtöiset ratkaisut.....	24
4.2.2 Sisäantennijärjestelmä	26
4.2.3 Aktiiviset toistimet	28
4.2.4 Passiiviset antenniratkaisut.....	29
5. Sisäkuuluvuus rakennushankkeessa	31
5.1 Rakennushanke	31
5.2 Rakennushankkeen toteutusmuodot.....	33
5.3 Menettelytapasuositukset	33
5.4 Sisäkuuluvuuden huomioiminen rakennushankkeessa	34
6. Haastattelututkimus	36
6.1 Tutkimusmenetelmä.....	36
6.2 Haastateltavat	37
6.3 Aihepiirit ja haastattelutulokset.....	37
6.3.1 Havaitut sisäkuuluvuusongelmat.....	38
6.3.2 Vastuu sisäkuuluvuudesta rakennushankkeessa.....	39
6.3.3 Virve 2.0 ja turvallisuusnäkökulmat.....	40
6.3.4 Sisäantenniverkot sähkösuunnitelmissa	40

6.3.5 Sähkösuunnittelijan rooli ja toimintaedellytykset	42
6.3.6 Sisäkuuluvuus rakennushankkeessa	43
6.3.7 Laite- ja tilavaraukset	44
6.3.8 5G-näkökulma ja vaihtoehtoiset ratkaisut	45
7. Pohdinta ja johtopäätökset	47
7.1 Näkökulmat sisäkuuluvuusongelmiin	47
7.2 Vastuu sisäkuuluvuudesta	48
7.3 Sisäkuuluvuus osana rakennushankkeetta	50
7.4 Sähkösuunnittelijan toimintaedellytykset	51
7.5 Laite- ja tilavaraukset	53
7.6 Tulevaisuuden näkymiä	55
8. Yhteenveto	56
Viitteet	58
Haastattelut	62
Liite 1	64

Lyhenteet

BDA	<i>Bi-Directional Amplifier</i> , eli kaksisuuntainen vahvistin tai toistin.
DAS	<i>Distributed Antenna System</i> , eli hajautettu antennijärjestelmä.
EDGE	<i>Enhanced Data rates for GSM Evolution</i> , on pakettikytkentäiseen tiedonsiirtoon suunniteltu tekniikka, joka perustuu GPRS-tekniikkaan.
EED	<i>Energy Efficiency Directive 2012/27/EU</i> , EU:n direktiivi energiatehokkuuden parantamisesta jäsenvaltioissa.
EPBD	<i>Energy Performance of Buildings Directive 2010/31/EU</i> , EU:n direktiivi rakennusten energiatehokkuudesta.
EU	<i>Euroopan Unioni</i> .
FSS	<i>Frequency Selective Surface</i> , eli taajuusselektiivinen pinta, jolla voidaan hallita radiosignaalien kulkua.
GHz	<i>Gigahertsi</i> on kansainvälisen yksikköjärjestelmän mukainen taajuuden yksikkö (10^9 Hz).
GPRS	<i>General Packet Radio Service</i> , on pakettikytkentäinen GSM-verkossa toimiva tiedonsiirtotekniikka.
GSM	<i>Global System for Mobile Communications</i> , toisen sukupolven matkapuhelinteknologia.
HSPA+	<i>HSPA Evolution</i> , siirtoprotokolla ja verkkoarkkitehtuuri kolmannen sukupolven matkapuhelinteknologialle.
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i> , on kansainvälinen tekniikan alan järjestö.
IoT	<i>Internet of Things</i> , eli esineiden internet.
LTE	<i>Long Term Evolution</i> on neljännen sukupolven laajakaistainen internet-yhteyden käyttöön suunniteltu langaton tiedonsiirtotekniikka.
MC-MTC	<i>Mission Critical Machine-type Communication</i> , tarkoittaa kriittistä koneiden välistä kommunikaatiota.
MHz	<i>Megahertsi</i> on kansainvälisen yksikköjärjestelmän mukainen taajuuden yksikkö (10^6 Hz).
MIMO	<i>Multiple-Input and Multiple-Output</i> , on tietoliikennetekniikka, jossa vastaanottoon ja lähetykseen voidaan käyttää samanaikaisesti useaa antennia.
mMTC	<i>Massive Machine-type Communication</i> , tarkoittaa massiivista koneiden välistä kommunikaatiota.
MoSi	<i>Monioperaattorisäätänniverkko</i> .
MRL	Maankäyttö- ja rakennuslaki 132/1999. Käsittää myös lain maankäyttö- ja rakennuslain muuttamisesta 812/2017.

MTC	<i>Machine-type Communication</i> , eli koneiden välinen kommunikaatio.
NMT	<i>Nordiska Mobiltelefongruppen</i> , ensimmäisen sukupolven matkaviestinverkko.
PIM	<i>Passive Intermodulation</i> , eli passiivinen keskeismodulaatio.
RakMK	<i>Rakentamismääräyskokoelma</i> . Suomessa rakentamista koskevat säännökset ja ohjeet on koottu rakentamismääräyskokoelmaan.
RES	<i>Renewable Energy Sources directive 2009/28/EC</i> , EU:n uusiutuvan energian käytön edistämisdirektiivi.
RF	<i>Radio Frequency</i> , eli radiotaajuus. Sähkömagneettisen säteilyn taajuusalue (3 kHz – 300 GHz).
RSRP	<i>Reference Signals Received Power</i> , eli referenssisignaalin vastaanottokentänvoimakkuus (dBm).
RSRQ	<i>Reference Signal Received Quality</i> , ilmaisee yllä mainitun referenssisignaalin laatua (dB).
SHF	<i>Super High Frequency</i> , eli mikroaalto- ja millimetritaajuuudet (3–30 GHz).
SINR	<i>Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio</i> , eli signaalin suhde häiriöön ja kohinaan (dB).
SISO	<i>Single Input Single Output</i> , eli yksi sisäänmeno ja yksi ulostulo.
SNR	<i>Signal-to-Noise Ratio</i> , eli signaali-kohinasuhde.
STUK	<i>Säteilyturvakeskus</i> .
TETRA	<i>Terrestrial Trunked Radio</i> on viranomaisille suunnattu digitaalinen puheradioverkko.
uMTC	<i>Ultra-reliable Machine-type Communication</i> , tarkoittaa kriittistä tai luotettavaa koneiden välistä kommunikaatiota.
UMTS	<i>Universal Mobile Telecommunications System</i> , kolmannen sukupolven matkapuhelinteknologia.
VIRVE	<i>Viranomaisradioverkko</i> on viranomaisten ja muiden luvan saaneiden toimijoiden puheliikenteeseen käyttämä radioverkko.
VoIP	<i>Voice over Internet Protocol</i> , tarkoittaa yleisesti tekniikkaa, jolla ääntä siirretään reaaliaikaisesti Internet-verkon välityksellä.
VR	<i>Virtual Reality</i> , eli virtuaali- tai tekotodellisuus.
Wi-Fi	Langattoman lähiverkon kauppanimi IEEE 802.11 -standardin mukaiselle tekniikalle.
WLAN	<i>Wireless Local Area Network</i> , eli langaton lähiverkko.

1. Johdanto

Sisäkuuluvuus eli matkaviestinverkon kuuluvuus rakennuksen sisätiloissa on ollut puheenaiheena ja myös tutkimustyön kohteena kuluneen vuosikymmenen aikana. Digitalisaatiossa on havaittavissa kaksi trendiä viime vuosikymmenen ajalta: yhä useammat palvelut ovat siirtyneet verkkoon ja langallisia tietoliikenneyhteyksiä on korvattu langattomilla yhteyksillä. Tämä tarkoittaa, että tietoliikenneyhteyksistä, mukaan lukien matkaviestinverkkojen sisäkuuluvuus, on tullut entistä tärkeämpi osa nyky-yhteiskuntaa. Puheliikenteen lisäksi tiedonsiirrosta on muodostunut vähintään yhtä tärkeä matkaviestinverkon palvelu. Toimivia tietoliikenneyhteyksiä on kuvailtu muun muassa ihmisen perustarpeeksi, jonka takia rakennusten sisäkuuluvuutta on pyritty varmistamaan myös lainsäädännön tasolta.

Rakennushankkeissa ei ole aina onnistuttu huomioimaan sisäkuuluvuutta, joka on voinut johtaa ongelmiin tällä alueella. Kasvaneiden taajuusalueiden lisäksi tähän on osaltaan vaikuttanut muutos käytettävissä rakennusmateriaaleissa tiukentuneiden energiatehokkuusvaatimusten myötä. Etenkin metallin määrä rakennuksen vaipassa on lisääntynyt. Sisäkuuluvuuteen vaikuttavat tekijät ovat kuitenkin olleet tiedossa jo pitkään, sillä radiosignaalien ominaisuuksia on tutkittu paljon ja ne tunnetaan hyvin. Viime vuosikymmenen aikana on tutkittu sisäkuuluvuuden ongelmakohtia ja kartoitettu mahdollisia ratkaisuja sekä ongelman laajuutta rakennusten osalta [1-6].

Diplomityö tarkastelee mahdollisia syitä, ratkaisuja sekä rakennushankkeen eri osapuolten näkemyksiä liittyen rakennusten sisäkuuluvuusongelmiin. Tavoitteena on pyrkiä selkeyttämään sähkösuunnittelijan toimenkuvaa suosittelemalla parhaaksi todettuja käytäntöjä sekä selvittää toimintamallia sähkösuunnittelussa sisäkuuluvuuden osalta. Mahdollisuuksien mukaan työssä pyritään selvittämään sähköalalla vallitsevaa yhteistä näkemystä liittyen rakennusten sisäkuuluvuuteen sekä arvioimaan sähkösuunnittelijan toimintaedellytyksiä sisäkuuluvuushankkeissa.

Diplomityön kirjoittamisen hetkellä ensimmäiset kaupalliset 5G-verkot on otettu käyttöön ja verkot laajentuvat koko ajan. Ensimmäiset 5G-teknologiaa hyödyntävät puhelimet tulivat Suomessa kuluttajien saataville edellisenä kesänä. Sisäkuuluvuusongelmien odotetaan lisääntyvän 5G-teknologian osalta, johtuen entistä korkeampien taajuusalueiden käyttöönotosta. Lisäksi viranomaisradioverkosta on suunnitteilla seuraava sukupolvi Virve 2.0. Arviolta vuoden 2022 aikana viranomaisradioverkko siirtyy toimimaan kilpailutuksen voittaneen kaupallisen operaattorin 4G-verkon päälle, joka tarkoittaa taajuusalueiden nousua myös viranomaisradioverkossa nykyisestä TETRA-verkosta luovuttaessa.

Teleoperaattoreiden ensisijaisena tavoitteena on toteuttaa sisäkuuluvuus varmistamalla riittävä ulkopeitto eli signaalintaso rakennuspaikalla. Tällöin sisäkuuluvuuden varmistamiseksi rakennuksen signaalinvaimennusominaisuuksiin tulee kiinnittää huomiota materiaalivalinnoilla tai edistää signaalin läpäisyä muilla tavoin, kuten rakenteisiin integroitujen antennielementtien avulla. Vaihtoehtona on myös varmistaa sisäkuuluvuus teleteknisten ratkaisujen avulla. Perinteisenä ja edelleen suosittuna ratkaisuna on ollut toteuttaa rakennukseen oma sisäantenniverkko, jossa radiosignaali tuodaan ulkoa rakennuksen sisälle ja jaetaan rakennuksessa tasaisesti sisäantenniverkon avulla. Muita vaihtoehtoja ratkaisuksi sisäkuuluvuuteen voivat olla esimerkiksi kotitukiasemat tai kiinteän yhteyden avulla välitettävät internet-puhelut. Suurempien taajuusalueiden käyttöönotto vaikuttaa myös antennielementtien ja sisäantenniverkkojen toimintaan, sillä sisäantenniverkot ovat optimoituja tietyille taajuusalueille.

Todennäköisesti tulevaisuudessa on edessä sisäantenniverkkojen saneerauksia, jotta yhteensopivuudesta voidaan varmistua Virve 2.0:n ja mahdollisesti myös 5G-taajuuksien kanssa.

Mahdolliset sisäkuuluvuusongelmat tiedostetaan entistä paremmin niin uudis- kuin korjausrakentamisessa. Tämä on heijastunut myös rakennusosalalle ja tällä hetkellä sisäkuuluvuus huomioidaan rakennushankkeissa vaihtelevasti, riippuen hankkeen osapuolista. Hyvä sisäkuuluvuus on monen asian summa, jolloin sitä kannattaa tarkastella hankekohtaisesti. Etenkin uudisrakentamisessa sisäkuuluvuuteen vaikuttavia tekijöitä ja tarpeellisia ratkaisuja voi olla vaikeaa arvioida, jolloin oikeiden päätösten tekeminen vaatii asiantuntemusta, osaamista ja kokemusta. Korjausrakentamisessa sitä vastoin tehtävien toimenpiteiden ja sisäkuuluvuuden välistä yhteyttä ei aina hahmoteta ajoissa. Rakennushankkeissa sisäkuuluvuutta ei ole aina huomioitu riittävän ajoissa tai siihen ei ole osattu varautua oikealla tavalla, jolloin se on myös koettu monitahoisuutensa vuoksi epäselväksi ja haastavaksi aiheeksi. Sisäkuuluvuuden varmistamiseksi ei yleensä tehdä selvää vastuun- tai työnjakoa rakennushankkeessa. Tämä on johtanut rakentamisessa tilanteeseen, jossa sisäkuuluvuus ja erityisesti sisäantenniverkkojen suunnittelu ja urakointi koetaan osittain erikoisalaksi. Telesuunnittelun alaisuudesta ja toteutettujen sisäverkkoratkaisujen määrästä huolimatta alalla koetaan, että yleisesti sähkösuunnittelutoimistoilla on suhteellisen heikko osaaminen liittyen sisäantenniverkkojen suunnitteluun ja toteuttamiseen.

Diplomityössä käytettyjä tutkimusmenetelmiä ovat kirjallisuuskatsaus ja haastattelututkimus. Kirjallisuuskatsauksella saavutetaan työlle ja sen johtopäätöksille teoreettinen pohja sekä pyritään keräämään sähkösuunnittelijalle ja muille sisäkuuluvuusasioihin perehtyville hyödyllistä tietoa. Osana diplomityötä tehtävällä haastattelututkimuksella pyritään kartoittamaan eri osapuolten näkemyksiä sekä selvittämään kokemuseräistä tietoa, jota ei aina ole kirjallisista lähteistä saatavilla. Haastattelututkimus on suuntaukseltaan kvalitatiivinen, eli laadullinen, joka tarkoittaa, että tutkimuksella pyritään ymmärtämään paremmin sisäkuuluvuuteen liittyviä asioita, ongelmia ja niiden yhteyksiä. Haastattelut on toteutettu puolistrukturoidusti teemahaastatteluina, eli haastateltavilta on kysytty samoista aihealueista ja tarpeen mukaan esitetty täsmentäviä kysymyksiä, mutta haastateltavalle on myös annettu mahdollisuus tuoda esiin omia kokemuksiaan ja tärkeäksi katsomiaan aiheita.

Diplomityö on tehty Insinööritoimisto Stacon Oy:n toimeksiantona. Sisäkuuluvuusasioiden odotetaan tulevan hankkeissa yhä enemmän esille tiedon kasvaessa sekä viranomaismääräysten myötä, joten aihe koettiin yrityksen sisällä ajankohtaiseksi ja siihen haluttiin panostaa opinnäytetyön muodossa. Yrityksen tilauskannan perusteella työssä keskitytään toimitiloihin ja julkisiin rakennuksiin, vaikka ratkaisuja voidaan soveltaa teknisesti myös asuinrakentamisessa. Työssä keskitytään vain maanpäällisiin rakennuksiin sekä tarkastellaan sisäkuuluvuutta yksittäisten hankkeiden näkökulmasta. Radioverkkojen terveysvaikutuksiin liittyvät kysymykset on rajattu työn ulkopuolelle. Lisäksi työssä ei oteta kantaa kaikkiin toteutussuunnitelmatasoisiin tai muihin vastaaviin yksityiskohtiin, sillä yksikään rakennushanke ei ole samanlainen ja toteutustapojen vaihdellessa sisäkuuluvuusratkaisut tulee arvioida aina hankekohtaisesti.

Diplomityö on jaettu kahteen osaan: teoreettiseen osaan ja haastattelututkimukseen. Työn teoreettinen osa on kirjallisuuskatsaus luvuissa 2–5. Työtä varten suoritettu haastattelututkimus on käsitelty luvussa 6 ja sen perusteella tehdyt johtopäätökset luvussa 7. Työn yhteenvedo on luvussa 8. Työssä käytetyt viitteet ja tarkemmat tiedot haastatteluista löytyvät työn lopusta.

2. Matkaviestinverkot

Tässä luvussa käydään läpi matkaviestinverkkojen ja viranomaisradioverkon toimintaa, sekä käytettäviä taajuusalueita ja teknologioita Suomessa.

Matkaviestinverkolla tarkoitetaan kohdeviestintään käytettävää verkkoa, jossa päätelaitteen yhteys toteutetaan radiosignaaleilla. Käytännössä matkaviestinverkon lähtökohtana on siis vapauttaa käyttäjä langallisista päätelaitteista ja sidonnaisuudesta yhteen paikkaan.

Matkaviestinverkko koostuu kiinteästä verkosta sekä tukiasemista ja langattomasta radioverkosta. Suuren maantieteellisen alueen matkaviestinverkosta käytetään nimitystä solukoverkko, jossa verkko muodostuu useista maantieteellisesti sidotuista tukiasemista, eli soluista, jotka ovat yhteydessä päätelaitteisiin ja runkoverkon kautta esimerkiksi toisiin tukiasemiin. Päätelaitteena voi toimia esimerkiksi puhelin, älylaite, reititin, langaton sensori tai muu vastaava laite. Solun koko ja muoto on riippuvainen esimerkiksi tukiaseman taajuusalueesta, tehosta, antennien suuntakuvioista, maston korkeudesta ja ympäristöstä. Erityyppisiä tukiasemia käytetään riippuen solun sijainnista. Esimerkiksi mastoon sijoitettuja tukiasemia käytetään harvaan rakennetulla alueella, kun taas taajamissa ja kaupungissa tukiasemat sijaitsevat yleensä talojen katolla tai julkisivuissa.

Yksinkertaistettuna tukiasema muodostuu antennista, lähetin-vastaanotin-parista ja keskussyksiköstä. Kaksisuuntainen tiedonsiirto on jaettu alalinkkiin (downlink) sekä vastaavasti ylälinkkiin (uplink). Alalinkkiyhteys muodostuu verkosta päätelaitteeseen päin ja vastaavasti ylälinkkiyhteys päätelaitteesta verkkoon päin.

Matkaviestinverkon suorituskykyyn ja kuuluvuuteen vaikuttavat oleellisesti verkon peitto ja kapasiteetti. Käytännössä verkon peittoa voidaan kasvattaa lisäämällä tukiasemien määrää tai käyttämällä matalampia taajuuksia. Kapasiteettia voidaan niin ikään lisätä uusilla tukiasemilla tiettyyn pisteeseen asti sekä nostamalla käytettävää taajuutta. Lisäksi matkaviestinverkon toimintakyky on tärkeää ottaa huomioon.

2.1 Matkaviestinverkot Suomessa

Matkapuhelinten ja -verkkojen kehitys on ollut huomattavan nopeaa viime vuosikymmeninä ja kehitystyö jatkuu aktiivisena. Suomi on ollut ja on edelleen edelläkävijä matkaviestinverkkojen kehityksessä. Tätä kehitystä kuvaa hyvin se, että matkapuhelinyhteys löytyy nykyään melkein jokaisesta kotitaloudesta [7]. Etenkin puheliikenteen lisäksi datansiirrosta on tullut merkittävä osa mobiiliverkkojen palvelua. Asukasta kohden Suomessa käytetään eniten dataa koko maailmassa [8].

Suomessa on tällä hetkellä kolme maanlaajuisesti toimivaa kaupallista mobiiliverkko-operaattoria (Elisa Oyj, Telia Finland Oyj ja DNA Oyj). Näiden lisäksi toimii Ahvenanmaalla yksi operaattori (Ålands Telekommunikation Ab), pelkästään datapalveluja tarjoava operaattori (Ukkoverkot Oy) ja viranomaisradioverkkoa hallinnoiva operaattori (Suomen Erillisverkot Oy). Edellä mainittujen lisäksi IoT:n parissa toimii tällä hetkellä kaksi operaattoria (Digita ja Connected Finland).

Matkaviestinverkkojen toteuttamiseen käytetyt teknologiat sekä taajuusalueet vaihtelevat maiden ja maanosien välillä. Taulukossa 1 on esitetty koottuna Suomessa käytettyjen verkkojen keskeisimmät tiedot. Matkaviestinverkot jaotellaan eri

sukupolvien verkkoihin (generation) käyttöönoton ajankohdan ja käytetyn teknologian perusteella. Suomessa on maanlaajuisesti käytössä tällä hetkellä 2G-, 3G- ja 4G-verkot. Suomi on ollut osaltaan kehityksen edelläkävijä myös uusimman sukupolven 5G-verkon käyttöönotossa.

Taulukko 1: Suomessa käytettyjen verkkojen teknologiat, taajuusalueet ja ajankohdat verkon teknologian ja sukupolven mukaan.

Sukupolvi	Teknologia	Taajuusalueet (MHz)	Ajankohta
1G	NMT	450, 900	1981–2003
2G	GSM	900, 1800	1991–
3G	UMTS	900, 2100	2001–
VIRVE	TETRA	400	2002–
4G	LTE	700, 800, 1800, 2100, 2600	2010–
5G		700, 3500, SHF	2018–

Suomessa on suhteellisen tiukka sääntely koskien matkaviestinverkkoja sekä käytettäviä taajuusalueita. Verkoille varatut taajuusalueet ovat luvanvaraisia, joten ne on käytettävä tehokkaasti. Luvista vastaa Viestintävirasto.

Tietoyhteiskuntakaaren (917/2014) [9] ja valtioneuvoston asetuksen (531/2018) [10] radiotaajuuksien käytöstä ja taajuussuunnitelmasta mukaan operaattoreille varatuilla radiotaajuuksilla toimivan lähettimen hallussapito ja käyttö on luvanvaraista, eikä lupia myönnetä yksityiskäyttäjille [11]. Lupia voidaan myöntää operaattoreiden lisäksi esimerkiksi tutkimuskäyttöön. Asetuksen perusteella myös käyttäjän omat aktiivilaitteet, kuten toistimet, ovat sisätilaratkaisuna lähtökohtaisesti poissuljettuja.

Ensimmäisen sukupolven analoginen NMT-teknologiaan perustunut 1G-verkko poistui vuonna 2003 käytöstä. Kaikki seuraavien sukupolvien verkot ovat perustuneet digitaaliseen tiedonsiirtoon, joka on tuonut mukanaan esimerkiksi tekstiviestit ja internet-palvelut.

Toisen sukupolven (GSM) piirikytkentäinen ja täysin digitaalinen matkapuhelinverkko on edelleen käytössä. 2G-verkko on suunniteltu ensisijaisesti puheliikenteeseen, eikä se tue pakettikytkentäistä dataliikennettä. Suomessa GSM-verkkoja käytetään 900 ja 1 800 MHz:n taajuusalueilla lähes koko maan kattavasti. Tiedonsiirtotarpeiden kasvaessa GSM-verkko ei pystynyt vastaamaan kysyntään, jolloin kehitettiin uusia tekniikoita toisen sukupolven verkkojen dataliikenteeseen. Kyseiset teknologiat ovat siis GPRS ja EDGE, joita on myös epävirallisesti kutsuttu 2.5G:ksi. [4]

Kolmannen sukupolven matkapuhelinverkot tunnetaan myös UMTS nimellä. UMTS-verkko on suunniteltu myös datansiirtoon ja sen teoreettinen siirtonopeus yltää kehittyneellä HSDPA+-verkkoteknologialla 42,2 Mbit/s nopeuteen. Tätä teknologiaa kutsutaan niin ikään 3.5G:ksi. UMTS-verkon vahvuuksia ovat erityisesti siirtonopeus ja taajuusalueen tehokas hyödyntäminen verrattuna GSM-verkkoon. [4]

Neljännän sukupolven verkot on toteutettu LTE-tekniikalla, joka on suunniteltu vastaamaan suurta tiedonsiirtonopeutta, toisin kuin edellisten sukupolvien verkot. Esimerkiksi korkealaatuinen videon vastaanotto ja lähetys on mahdollista. LTE-verkko on suoritettu puhtaasti pakettikytkentäisesti, joka tarkoittaa, että äänipuhelut suoritetaan GSM- tai UMTS-verkon kautta.

LTE-tekniikalla päästään teoreettiseen 100 Mbit/s tiedonsiirtonopeuteen, kun taas 4G-verkossa edistyneellä LTE-Advanced tekniikalla päästään jopa teoreettiseen 1 000 Mbit/s nopeuteen alalinkille, joka on myös asetettu 4G:lle vaatimukseksi. Kuluttajille on tällä hetkellä tarjolla 300–600 Mbit/s LTE-Advanced yhteyksiä. Kuitenkin käytännössä keskimääräinen tiedonsiirtonopeus on toistaiseksi vuonna 2019 liikkunut alle 100 Mbit/s alalinkissä ja hieman alle 30 Mbit/s ylälinkissä [4, 12].

Vaikka 4G:lle asetetut vaatimukset on saavutettu vasta hiljattain, seuraavan sulkupolven 5G-verkkojen lanseerausta on ehditty tästä huolimatta valmistelemaan. Tähän mennessä perinteiset käyttäjäkeskeiset mobiililaajakaistasovellukset, kuten teräväpiirtovideoiden katselu, ovat ajaneet mobiiliverkkojen kehitystä lähinnä kasvattamaan tiedonsiirtonopeuksia. Kasvavan tiedonsiirtonopeuden tarpeen lisäksi seuraavan sukupolven (5G) verkkojen kehitystä ajavat uudet sovellukset erilaisissa koneiden välisissä kommunikaatioissa [13].

Uutta 5G-teknologiaa on suunnitteilla hyödyntää laajasti eri sovelluksissa, kuten koneiden välisessä kommunikoinnissa (MTC), esineiden internetissä (IoT), teollisuudessa ja liikenteessä, käyttäjän reaaliaikaisessa paikantamisessa, virtuaalitodellisuuden luonnissa (VR) sekä suurien datamäärien keräämisessä ja tekoälyn parissa. Tämä asettaa verkoille siirtonopeuden ja kapasiteetin lisäksi muita vaatimuksia liittyen verkon tehokkuuteen, sujuvaan tietoliikenteeseen, luotettavuuteen ja turvallisuuteen.

Sovellukset koneiden välisessä kommunikaatiossa voidaan jakaa kahteen kategoriaan: massiivisen (mMTC) ja kriittiseen (MC-MTC) koneiden väliseen kommunikaatioon. Kriittisestä koneiden välisestä kommunikaatiosta voidaan käyttää myös nimitystä erittäin luotettava koneiden välinen kommunikaatio (uMTC). Massiivisessa kategoriassa verkko koostuu edullisista ja vähän energiaa kuluttavista laitteista, jotka lähettävät vähän dataa mutta yhdessä muodostavat suuren verkon. Kriittisissä sovelluksissa, kuten liikenteessä, älykkäässä sähköverkossa tai teollisuuden tuotantoprosessissa yhteyden tulee olla luotettava, aina saatavilla ja viiveeltään pieni, jopa yksi millisekunti. [13]

Suurten siirtonopeuksien, lyhyiden viiveiden (1–10 ms) ja paremman luotettavuuden saavuttamiseksi 5G-verkoissa voidaan hyödyntää korkean taajuusalueen lisäksi esimerkiksi ohjelmallisesti määritettyä verkkoa (SDN), asiakaskohtaisia kaistoja (slicing), moniantennitekniologiaa (MIMO), tehoa suuntaavaa säteenmuodostusta (beamforming) ja full-duplex-tiedonsiirtoa.

5G-verkolle on varattu 700 MHz:n taajuusalueen lisäksi aiempia matkaviestintaajuuksia suurempi 3 500 MHz:n taajuusalue. Nopeus verkolle 3 500 MHz:n taajuusalueella on 2 Gbit/s luokkaa, kun taas korkeammilla taajuuksilla nopeudet 10 Gbit/s asti ovat mahdollisia. Tulevaisuudessa tullaan todennäköisesti 5G:n osalta hyödyntämään mikroaalto- ja millimetritaajuuksia (SHF). Todennäköinen taajuusalue on Suomessa 26–28 GHz:n kodalla, 30 GHz:n ollessa todennäköinen yläraja 5G-teknologialle, vaikka jopa 70 GHz:n taajuuden käyttöä on tutkittu [14].

5G-verkon laajamittainen testaus aloitettiin suomessa 2018 ja samana vuonna tulivat ensimmäiset kaupalliset 5G-tukiasemat. Vuoden 2019 aikana 5G-verkko on jatkanut levittäytymistä, mutta laajasta kattavuudesta ei työn kirjoittamisen hetkellä vielä voida puhua. Ensimmäiset 5G-teknologiaa hyödyntävät puhelimet tulivat myyntiin kesällä 2019, joten 5G-verkko tulee laajentumaan entisestään päätelaitteiden yleistyessä.

2.2 Viranomaisradioverkko

Viranomaisradioverkko (lyhennettynä VIRVE) on maanlaajuinen TETRA-standardiin perustuva radioverkko, jota operoi ja kehittää Suomen Erillisverkot Oy. Erillisverkot on valtion kokonaan omistama erityistehtävayhtiö ja sen omistajaohjauksesta vastaa valtioneuvoston kanslia.

Virveä käyttävät viranomaiset ja muut luvan saaneet yksityiset toimijat. Esimerkiksi poliisi, puolustusvoimat, pelastustoimi, rajavartiolaitos, tulli, sosiaali- ja terveystoimi sekä kunnat lukeutuvat Virven käyttäjiin. Yksityiset toimijat esimerkiksi teollisuudessa tai turvallisuusalalla voivat saada luvan verkon käyttöön. Viranomaisverkon lisäksi eri toimijoilla voi olla käytössään omia yksityisiä radioverkkoja.

Virve on yksi viranomaisten tärkeimmistä viestintävälineistä, joten suosituksena on, että Virve on saatavilla merkittävän henkilö-, ympäristö-, omaisuus- tai liiketoimintariskin sisältävissä kohteissa ja kiinteistöissä. Näitä kohteita ovat muun muassa sairaalat, kauppakeskukset, tunnelit, maanalaiset tilat, terminaalit ja voimalaitokset.

Lähtökohtana on rakentaa Virve kattavaksi ulko- ja sisätiloissa muiden matkapuhelinverkkojen tapaan hyvän ulkopeiton avulla. Aina ulkopeitto ei kuitenkaan riitä takaamaan sisäkuuluvuutta ja etenkin edellä mainituissa kriittisissä kohteissa Virven sisäpeitto varmistetaan erillisillä sisätilaratkaisulla. Sisätilaratkaisun toimivuuden edellytyksenä on kuitenkin yleensä riittävä ulkopeitto.

Pelastuslain (379/2011) pykälän 109 (1353/2018) mukaan Virve voidaan vaatia toteutettavaksi viranomaisen toimesta [15]. Yleensä viranomaisradioverkon rakentamisen perusteena ovat kiinteistön suuri koko, muutoin haastavat ominaisuudet tai poikkeukselliset henkilö- ja paloturvallisuutta vaarantavat olosuhteet. Pelastusviranomainen tekee rakennukselle riskianalyysin, jonka perusteella todetaan tarve Virve-sisäpeitolle ja se merkitään rakennuslupan ehtoihin. Tällöin laiminlyönnit sisäpeiton osalta voivat jopa estää rakennuksen käyttöönoton. [16]

Virven sisäpeiton tulisi olla kattava koko kiinteistössä. Virve-sisätilaratkaisujen laajuusmääritykset tulee tehdä yhteistyössä pelastusviranomaisen kanssa, jos Virve-sisätilapeitto on määrätty toteutettavaksi kiinteistöön. Toiminnanharjoittaja voi myös oman riskianalyysin perusteella toteuttaa sisätilapeittoratkaisun omaehtoisesti. Virven sisäverkon tarvekartoituksessa käytetään L1-lomaketta rakennuslupavaiheessa. Samaa lomaketta käytetään myös lähtötietona sisäverkon suunnittelussa ja toteutuksessa. [16, 17]

Virve-sisätilaratkaisu tulee suunnitella aina tapauskohtaisesti. Yleinen toteutustapa on kuitenkin toteuttaa Virve aktiivisella toistimella ja sisääntenniverkolla. Tällöin signaali voidaan vastaanottaa, vahvistaa ja lähettää molemman suuntaisesti rakennuksen ja muun verkon välillä. Muita vaihtoehtoja on esimerkiksi yksittäiseen tilaan soveltuva passiivinen toistin tai harvinaisempi erillinen tukiasema. Erillisverkoilta löytyy ohjeistus kuuluvuuden toteuttamisesta ja suunnitelmien sisällöstä. Aktiivilaitteiden on oltava aina Erillisverkkojen hyväksymiä ja asennukset tehdään Erillisverkkojen ohjeistuksen mukaisesti. Erillisverkot suorittaa lisäksi asennukselle lopputarkastuksen. [16, 17]

Virven tukiasemia on Suomessa noin 1 400 kappaletta ja verkko on käytännössä koko maan kattava. Naapurimaissamme Ruotsissa, Norjassa ja Virossa on samanlaiset viranomaisradioverkot. Suomen, Ruotsin ja Norjan verkot on liitetty yhteen, joka parantaa yhteistyötä raja-alueilla. [16, 18]

Tällä hetkellä Virve toimii 380–395 MHz:n taajuusalueella. Huomioitavaa on kuitenkin, että vuonna 2022 on suunnitteilla siirtyminen mobiiliverkkopohjaiseen Virve 2.0 -verkkoon, joka tarkoittaa verkon toteuttamista viranomaisten ja kaupallisten toimijoiden kanssa yhteistyössä. Tämä mahdollistaa kuvien, videoiden ja datan siirron myös viranomaisradioverkon välityksellä. Nykyinen Virve säilyy toiminnassa ainakin vuoteen 2025 asti. Virve 2.0 tullaan käytännössä toteuttamaan kilpailutuksen voittaneen operaattorin 4G- eli LTE-verkon päälle. Suunniteltaessa Virve-sisätilaratkaisuja lähtökohtana tulisi siis nykyään olla laajakaistaverkko. Tämä tarkoittaa esimerkiksi komponenttien valitsemisen sopivaksi LTE-verkkoon, jolloin sisäpeitto voidaan toteuttaa yhdessä kaupallisten operaattorien sisäpeitolla Virven nykyisten taajuuksien lisäksi. [16, 17, 19]

Siirtyminen TETRA-pohjaisesta verkosta LTE-tekniikkaan tarkoittaa kuitenkin tällä hetkellä oleellisia muutoksia käytettävään taajuusalueeseen. Taajuuden kasvattaminen heikentää radiosignaalin läpäisykykyä ja lisää sisäantenniverkossa syntyviä vaimennuksia. Yhdessä nämä tekijät voivat aiheuttaa saneeraustarpeen myös nykyisissä Virve-sisäverkoissa.

3. Sisäkuuluvuusongelmat

Tässä luvussa käydään läpi sisäkuuluvuusongelmiin vaikuttavia tekijöitä. Lisäksi luvussa esitellään lyhyesti sisäkuuluvuuteen liittyvää lainsäädäntöä.

Matkaviestinverkot ovat muodostuneet oleelliseksi osaksi yhteiskuntaa, sillä ilman toimivia tietoliikenneyhteyksiä kuluttajilla ja yrityksillä on vähenevissä määrin riittävät toimintaedellytykset, joten oikeus viestinnän peruspalveluihin on turvattu Suomessa. Se kattaa oikeuden saada tietyt toimivat ja kohtuuhintaiset yleispalvelut kotiin tai yrityksen toimipisteeseen. Yleispalvelun kannalta Viestintävirasto katsoo riittäväksi, että matkapuhelinliittymä toimii yhdessä pisteessä kotona tai yrityksen toimipaikassa. [20]

Riittävä kuuluvuuden määritelmä kuitenkin riippuu tarvittavasta datansiirtonopeudesta sekä tarvittavasta kuuluvuusalueesta rakennuksessa. Käytännössä monesti tilanne on se, että toiminnan ja turvallisuuden kannalta kuuluvuus yhdessä pisteessä rakennusta ei ole riittävä. Yrityksissä on monesti tarve laajemmalle kuuluvuudelle ja kotona sekä työpaikalla turvallisuus paranee, jos hätäpuheluita voi soittaa kaikkialta rakennuksesta. Tilanne voi olla myös niinkin vakava, että riittävän hyvää kuuluvuutta ei löydy mistään kohtaa rakennuksen sisältä. Näiden epäsuotuisten tilanteiden välttämiseksi tulisi sisäkuuluvuuteen kiinnittää huomioita jo rakennushankkeen alusta lähtien.

Sisäkuuluvuusongelmat ovat nousseet esille etenkin viime vuosina. Muutos käytetyissä rakennusmateriaaleissa yhdessä entistä korkeampien taajuusalueiden käyttöönoton kanssa luo haasteellisen ympäristön sisäkuuluvuuden toteuttamiselle ilman erillisiä ratkaisuja. Käytännössä metallin lisääntyminen esimerkiksi erilaisina kalvoina eristeissä tai ikkunoissa on seurausta energiatehokkuusvaatimusten kiristymisestä. Rakennuksen materiaaliveimennuksien lisäksi sisäkuuluvuusongelmat voivat johtua myös esimerkiksi maastoesteistä.

3.1 Lainsäädäntö

Rakennusten ja kiinteistöjen sisäkuuluvuutta on pyritty varmistamaan lainsäädännön tasolta. Maankäyttö- ja rakennuslain (812/2017) § 117 j mukaan rakennushankkeeseen ryhtyvän vastuulla on huolehtia sisäkuuluvuudesta rakennushankkeessa [21], joten rakennusvalvontaviranomaisten tulisi varmistua, että sisäkuuluvuusasiat on huomioitu.

Pelastuslaki (1353/2018) § 109 velvoittaa rakennuksen omistajaa hankkimaan Virve-sisäpeittoon tarvittavat laitteet sekä pitämään ne toimintakunnossa, viranomaisen niin määrätessä [15].

Rakennushankkeissa on alettu kiinnittämään yhä enemmän huomioita sisäkuuluvuusasioihin, osittain lainsäädännön seurauksena, ehkä osittain lisääntyneiden sisäkuuluvuusongelmien vuoksi. Maankäyttö- ja rakennuslaki jättää kuitenkin tulkinnan varaa ja liikkumavaraa esimerkiksi sisäkuuluvuuden toteutustavan suhteen, sillä lain mukaan sisäkuuluvuusasioissa voidaan ottaa huomioon kustannustehokkuus.

”Asuin-, majoitus- tai työtiloja sisältävän rakennuksen teknisten ratkaisujen on kustannustehokkuus huomioon ottaen mahdollistettava edellytykset matkaviestinten kuuluvuudelle sisätiloissa, ellei kysymyksessä ole rakennus, jonka sisätilakuuluvuutta on vaimennettava.”

Voidaan kuitenkin todeta, että yleisen edun mukaista on pyrkiä myös rakentamisen saralla näkemukseen, jossa hyvien tietoliikenneyhteyksien koetaan lisäävän rakennuksen arvoa käyttäjilleen ja siten myös rakennuttajalleen.

Sisäkuuluvuus on huomioitu myös operaattoreille myönnettävissä verkkotoimiluvissa, joissa operaattoreille on annettu väestöpeittovelvoite. Operaattoreille määritetyssä peittovelvoitteessa esitetään myös kohtuullisen sisätilakuuluvuuden varmistaminen rakennettaessa peittoa.

3.2 Rakennusten energiatehokkuusvaatimukset

Osana taistelua ilmastonmuutosta vastaan energiatehokkuus on noussut isoon rooliin, koska merkittävä osa ilmastonmuutokseen vaikuttavista kasvihuonekaasupäästöistä on peräisin energiantuotannosta ja energiankulutuksesta, joka sitoo energia- ja ilmastopolitiikan tiukasti toisiinsa. Rakennusten ja rakentamisen energiankulutus on merkittävä yksittäinen osa, noin 40 prosenttia, kaikesta energiankulutuksesta, jolloin myös nimenomaan rakennuksiin kohdistuu energiatehokkuuden kiristyspaineita. [22, 23, 24]

Vaatimukset rakennusten energiatehokkuudelle ovat kiristyneet tasaiseen tahtiin, etenkin vuoden 2008 jälkeen, EU:n hyväksyttyä ilmasto- ja energiapakettinsa, jossa on määritetty tavoitteet kasvihuonekaasupäästöjen pienentämiselle ja energiatehokkuuden parantamiselle. Suomessa energiatehokkuuden parantamisen vaikutukset on huomattu etenkin rakentamisessa, ottaen huomioon pohjoinen ilmastomme [3].

Merkittävin rakennusten energiatehokkuuteen vaikuttaneista EU:n päätöksistä on ollut rakennusten energiatehokkuusdirektiivi (EPBD), jonka pohjalta on lähdetty siirtymään kohti matalaenergiarakentamista. Direktiivi edellyttää, että kaikkien uusien julkisten rakennuksien tulisi olla lähes nollaenergiarakennuksia (nZEB) vuonna 2018 ja kaikkien uusien rakennusten vuonna 2020. Direktiivin mukaan korjausrakentamiselle tulee asettaa myös vähimmäisvaatimukset. Lähes nollaenergiarakennuksiin liittyviä käsitteitä ja tavoitteita tutkittiin FinZEB-hankkeessa [25]. Lisäksi ainakin kaksi muuta EU-tasolta tulevaa päätöstä vaikuttaa rakennusten energiatehokkuuteen. Energiatehokkuusdirektiivi (EED) edellyttää jäsenmailta pitkän aikavälin strategiaa rakennuskannan energiatehokkuuden parantamiseen ja uusiutuvan energian käytön edistämisdirektiivi (RES) puolestaan vaikuttaa uusiutuvien energianlähteiden käyttöön rakennuksissa.

Rakentamista koskevat yleiset edellytykset on määritelty maankäyttö- ja rakennuslaissa. Näihin kuuluvat rakentamisen viranomaisvalvonta ja lupamenettely sekä yleiset tekniset vaatimukset, mukaan lukien energiatehokkuuteen liittyvät vaatimukset. Maankäyttö- ja rakennuslain lisäksi rakentamista koskevia tarkkoja säännöksiä ja ohjeita on koottu Suomen rakentamismääräyskokoelmaan (RakMK).

Energiatehokkuusvaatimuksiin on vaikuttanut myös energian hinnan nousu. Päästöjen lisäksi energiakustannuksiin haetaan säästöä julkisella ja yksityisellä puolella huomioimalla energiatehokkuus rakentamisessa. Rakennusten energiatehokkuuden parantaminen on tapahtunut muun muassa parantamalla rakennuksen lämmöneristävyyttä ja tiiveyttä. Lämmöneristävyyttä on lisätty kasvattamalla eristepaksuutta, siirtymällä erityyppisiin eristelevyihin ja pienentämällä ikkunoista aiheutuvia lämpöhäviöitä. [3]

Yhtenäiset metallipinnat, kuten seinissä, katolla tai julkisivuissa, tekevät rakennuksesta tiiviin myös radiosignaalin kannalta. Esimerkiksi alumiinipintaisten uretaanilevyjen signaalin vaimennus on voimakasta. Lämmöneristeiden lisäksi metallipintaisia kalvoja löytyy uusista energiatehokkaista ikkunoista. Selektiivilasi ikkunassa estää tehokkaasti lämpösäteilyn karkaamisen rakennuksesta ja lisää myös asumismukavuutta, mutta samalla ne estävät tehokkaasti radiosignaalin etenemisen. [3, 26]

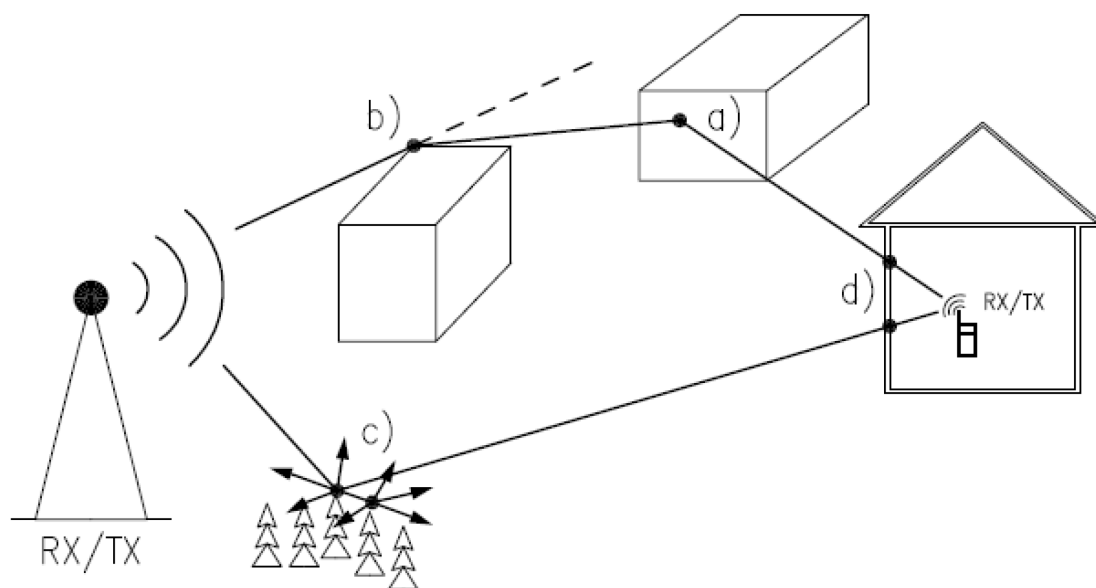
Ikkunat ovat olleet radiosignaleille tärkeä reitti rakennuksen sisätiloihin, jolloin selektiivilaseilla on suuri merkitys sisäkuuluvuuden kannalta [3]. Ikkunat ovat usein myös energiatehokkuuden kannalta tärkeässä osassa, jolloin tärkeysjärjestyksessä energiatehokkuusmääräykset ajavat hyvin usein sisäkuuluvuuden edelle. Energiatehokkuusvaatimukset eivät suinkaan kohdistu vain lämmöneristyksen parantamiseen. Rakennuksessa talotekniikka sekä energianmuoto ovat myös ratkaisevassa osassa energiatehokkuuden kannalta.

3.3 Matkaviestinverkon ominaisuudet

Radiosignaali etenee suhteellisen hyvin vapaassa tilassa. Radiosignaalit pystyvät läpäisemään tarvittaessa esteitä, riippuen esteen materiaaliominaisuuksista. Tärkeimmät ominaisuudet signaalin läpäisyn kannalta ovat heijastuminen ja vaimennus.

Vaimennukseen vaikuttavat oleellisesti materiaalin ominaisuudet, kuten johtavuus ja materiaalin paksuus sekä radiosignaalin taajuus, kun taas heijastumiseen vaikuttaa oleellisesti myös signaalin tulokulma. Etenkin hyvin sähköä johtavien materiaalien, kuten metallien käyttö tai paksut seinärakenteet yhdessä korkeiden taajuuksien kanssa voivat aiheuttaa sisäkuuluvuusongelmia.

Lähetetty radiosignaali voi kulkeutua vastaanottimeen myös ilman suoraa näköyhteyttä. Signaalin kulkeutuminen tapahtuu tällöin heijastumisen, siroinnan ja diffraktion kautta, joista aiheutuu myös häviöitä signaalille. Näitä ilmiöitä on havainnollistettu kuvassa 1. Radiosignaali voi siis saapua vastaanottimelle eri reittejä pitkin eri ajanhetkinä (multipath propagation), jolloin signaalien vaihe-eron mukaan ne voivat vahvistaa tai heikentää toisiaan. [5]



Kuva 1: Signaalin kulkeutuminen rakennukseen sekä a) heijastumisen, b) diffraktion, c) siroinnan ja d) vaimentumisen vaikutus signaaliin kulkuun. [5]

Radioverkkoja rakennettaessa tulisi edellä mainitut ilmiöt ottaa mahdollisuuksien mukaan huomioon, mutta aina tämä ei kuitenkaan ole helppoa. Samat lainalaisuudet pätevät työskennellessä makrotason soluverkon sekä sisäantenniverkon parissa. Etenkin vaimentumisella rakenteissa on suuri merkitys sisäkuuluvuuden osalta myös sisäantenniverkossa, joten rakennuksen sisäiset rakenteet ja eri väliseinätyypit tulee huomioida.

Pelkästään keskittymällä signaalin vaimennukseen ei voida täysin varmistua kuuluvuudesta, sillä käytännön kuuluvuuteen ja tiedonsiirtonopeuteen vaikuttaa esimerkiksi päätelaitteen vastaanottama hyöty- ja kohinateho. Signaali-kohinasuhteella (SNR) kuvataan järjestelmässä esiintyvän hyötysignaalin tehon suhdetta kohinatehoon ja se voidaan ilmaista desibeleinä. Radioverkossa esiintyy väistämättä kohinaa jonkin verran, vaikka suunnittelu olisi huolellista. Esimerkiksi puhe- ja hidas dataliikenne ei tarvitse korkeaa modulaatiota, jolloin pieni signaali-kohinasuhde on riittävä (noin 10 dB), kun taas nopeilla yhteyksillä signaali-kohinasuhteen tulee olla suurempi (>20 dB), jotta voidaan käyttää riittävää modulaatiotasoa suurten datanopeuksien saavuttamiseksi. Sisäantenniverkossa signaalin laatuun vaikuttavat signaali-kohinasuhde, taustakohina ja PIM-häiriöt. Pyrittäessä hyvään lopputulokseen, etenkin verkon siirtonopeuden suhteen, tulee radiotien laatuun kiinnittää huomiota, sillä radiokanavan häiriöt ja häipymät voivat huonontaa vastaanottoa. [5, 27, 28]

Kuuluvuuden määrittelyssä voidaan käyttää apuna eri kuuluvuusparametrejä radioverkolle. Tyypillisimpiä näistä LTE-verkossa ovat vastaanotettavan referenssisignaalin taso (RSRP), eli vastaanottokentänvoimakkuus, sekä referenssisignaalin laatu (RSRQ) ja signal-to-interference-plus-noise-suhde (SINR), joka myös kuvaa signaalin laatua. Taulukossa 2 on esitetty ohjeellisia arvoja saavutettavasta palvelun laadusta suhteessa kentänvoimakkuuteen ja signaalin laatuun LTE-verkossa. Yleisesti voidaan todeta, että vastaanottokentänvoimakkuus tulisi olla suurempi kuin -100 dBm, kun pyritään hyvään palvelun laatuun LTE-verkossa. Vastaavasti viranomaisradioverkossa radioteknisenä vaatimuksena sisätiloissa kentänvoimakkuudelle on -86 dBm luotettavan kuuluvuuden takaamiseksi. [16, 28]

Taulukko 2: Palvelun laatu suhteessa LTE-verkon eri kuuluvuusparametreihin. [28]

Palvelun laatu	RSRP (dBm)	RSRQ (dB)	SINR (dB)
Erinomainen	> (-95)	> (-5)	> 21
Hyvä	-95 – (-104)	-6 – (-8)	20 – 15
Välttävä	-105 – (-115)	-9 – (-11)	14 – 10
Huono	< (-116)	-12 – (-15)	< 10

3.4 Materiaaliminaisuudet

Radiosignaaleiden etenemistä rakennukseen ja perinteisten rakennusmateriaalien vaikutusta on tutkittu kattavasti [29, 30] ja ne tunnetaan hyvin, mutta tutkimusta moderneissa rakennuksissa käytettyjen rakennusmateriaalien vaikutuksesta radiosignaaleihin ei ole saatavilla tai sitä on vähän. Radiosignaalin vaimentumiseen vaikuttaa etenkin materiaalin paksuus sekä sen vaimennusominaisuudet ja muut läpäisyominaisuudet. Radiosignaali voi edetä monilla tavoin väliaineessa tai rakennuksessa. Näitä keinoja ovat heijastuminen, läpäisy, sironta ja taittuminen. [26]

Rakennustekniikan kannalta kuuluvuuteen vaikuttavat etenkin hyvin sähköä johtavat materiaalit, kuten metalliset rakenteet, jotka siten myös vaimentavat radiosignaaleita tehokkaasti. Etenkin levy-, kalvo- ja verkkomaiset metallirakenteet ovat yleisiä julkisivuissa. Metallia on esimerkiksi eristeissä, betoniraudoituksissa, rappausverkoissa, katteissa, ikkunan pokissa ja lasituksissa. Selektiivikalvon ansiosta energiatehokkaat ikkunat myös vaimentavat radiosignaalia tehokkaasti. [2, 31]

Kuuluvuuteen rakennuksen sisätiloissa ei vaikuta ainoastaan rakennuksen vaipan ominaisuudet. Rakennuksen rungolla ja muulla rakennusmassalla on myös vaikutusta signaalin etenemiseen, esimerkiksi välipohja- ja seinärakenteilla voi olla oleellinen vaikutus kuuluvuuteen rakennuksessa. Etenkin isojen rakennusten maantasakerroksissa ja rakennuksen keskiosissa kuuluvuus on voinut olla oleellisesti muuta rakennusta huonompi. [26, 31]

Itse rakennustavassa ei ole kuitenkaan tapahtunut merkittävää muutosta. Eristepaksumuodot ovat kuitenkin kasvaneet ja villoista on siirrytty enenevässä määrin eristelevyihin. Kerros- ja rivitalot sekä julkiset rakennukset, toistaiseksi muutamia poikkeuksia lukuun ottamatta, rakennetaan edelleen betonielementeistä. Esimerkiksi muualla Euroopassa rakennetaan paikallaan muuraamalla enemmän. Paikallaan muuratuissa taloissa voi metallin määrä olla rakenteissa pienempi, jolloin myös radiosignaalin eteneminen on rakennuksessa parempaa, sillä raudoitettu betonielementti vaimentaa radiosignaalia tehokkaasti. [26]

Radiosignaalin taajuus vaikuttaa merkittävästi sen vaimentumiseen rakenteissa, jolloin vertailtaessa eri materiaalien vaimennuksia keskenään on tärkeää huomioida taajuus, jolla vaimennus on todettu ja puhua vaimennuksista taajuuskaistoittain. Taulukossa 3 on esitetty tyypillisten rakennusmateriaalien aiheuttamia vaimennuksia.

Taulukko 3: Eri materiaalien vaimennuksia desibeleinä (dB) mitattuna eri taajuusalueilla. [26, 32]

Rakenne	Taajuusalue (MHz)				
	500	1000	2000	3500	5000
Tiili (180 mm)	4	5,5	8	20	32
Tiili (180 mm) ja betonielementti (203 mm)	21	25	33	60	67
Tiili (180 mm) ja kevytlekaharkko	8	11	10	29	33
Betonielementti (208 mm)	20	23	29	47	49
Kevytlekaharkko (2×203 mm)	13	17	18	25	28
Raudoitettu betonielementti (203 mm), 140×140 mm	22	28	31	50	53
Raudoitettu betonielementti (203 mm), 70×70 mm	26	30	37	53	58
Ikkunalasi (13 mm)	1	2	3	0,5	0,5
Kuiva puu (38 mm)	2	3	3	3	3
Kuiva puu (152 mm)	5	6	9	19	20

Taulukon 3 perusteella voidaan todeta, että nyrkkisääntö, jonka mukaan radiosignaalin vaimennus kasvaa taajuuden kasvaessa, pitää paikkansa suurimmalle osalle rakennusmateriaaleja. Huomioitavaa on myös, että esimerkiksi rakennusmateriaalin, kuten betonin, kosteus voi vaikuttaa oleellisesti sen vaimennusominaisuuksiin [33].

Taulukossa 4 on esitetty mitattuja vaimennuksia moderneille rakennusmateriaaleille ja ulkoseinärakenteille. Taulukossa on esitetty alumiinikalvolla päällystetyn polyuretaanieristelevyn, lasivillan sekä kahden ikkunatyypin, selektiivi-ikkunan ja ei-selektiivi-ikkunan vaimennukset. Taulukossa 4 on esitetty vaimennukset myös valmistuneessa ja nykyiset määräykset täyttävässä kohteessa kahdelle eri ulkoseinärakenteelle. Etenkin alumiinikalvollisen polyuretaanieristelevyn vaimennukset ovat huomattavia. Taulukosta myös nähdään, että selektiivikalvollisen ikkunan vaimennus verrattuna perinteiseen ikkunaan on huomattava. Tämä on oleellista, sillä radiosignaaleille etenkin elementtirakennuksessa ikkunat ovat olleet tärkeä reitti sisälle rakennukseen.

Taulukko 4: Ulkoseinämateriaalien ja -rakenteiden mitattuja radiosignaalin vaimennuksia desibeleinä (dB) eri taajuuksalueilla. [4]

Rakenne	Taajuuksalue (MHz)									
	700	800	900	1800	2000	2600	3500	5000	6000	ka.
Alumiinikalvo ja PU-eriste	20,1	22,6	27,5	34,7	34,3	34,5	39,3	41,2	46,0	37,6
Mineraalivilla	0,2	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1	0,2	0,3	0,2
Seinärakenne (380 mm)	12,6	14,5	14,2	15,2	13,9	18,3	22,3	31,3	30,8	21,6
Seinärakenne (440 mm)	18,3	17,5	20,6	26,8	24,1	26,4	33,1	38,7	45,5	32,5
Ikkuna (selektiivi)	30,9	32,9	17,1	22,8	18,7	37,3	29,1	28,7	28,6	28,2
Ikkuna (tavallinen)	1,2	1,4	0,7	5,7	3,3	2,5	6,7	8,1	5,3	6,7

Yksittäisten materiaalien vaimennusten tunteminen ei kuitenkaan käytännössä riitä, vaan tietoa tarvitaan myös rakennuksen kokonaisvaimennuksesta eri rakennustyypeittäin [26], jotta kohteen sisäkuuluvuustilanne pystytään arvioimaan. Taulukossa 5 on arvioitu vaimennuksia eri rakennustyypeille ja vaimennukseen vaikuttavia tekijöitä. Tässä taulukossa ei ole esitetty vaimennusarvoja taajuuskaistoittain.

Taulukko 5: Eri rakennustyyppien tavallisia vaimennuksia desibeleinä (dB). [18]

Rakennustyyppi	Tyypillinen vaimennus	Vaikuttavat tekijät
Puutalo	5–20	Metallikalvot
Rivitalo (betonirunko)	7–20	Kevyet rakenneosat
Kerrostalo (betonirunko)	20–35	Metallikalvot
Kerrostalo (matalaenergia)	25–40	Metallikalvot

Rakennemateriaalien ja -ratkaisuiden helpompaan vertailuun on esimerkiksi ehdotettu ratkaisuksi RF-lukua [34]. Mittausten perusteella RF-luku voidaan antaa taajuuskaistoittain tai muodostaa yksittäinen karkea vertailuluku materiaalikohtaisesti. RF-luvun tarkoituksena on tarjota arkkitehteille ja rakennesuunnittelijoille kokonaiskuva ulkokuorirakenteiden vaikutuksesta radiosignaaleiden vaimennukseen, jolloin sisäkuuluvuus olisi helpompi huomioida rakenneratkaisuissa.

4. Sisäkuuluvuuden toteutusvaihtoehdot

Tässä luvussa käydään läpi yleisimmät toteutusvaihtoehdot sisäkuuluvuuden varmistamiseksi. Toteutusvaihtoehdot voidaan jakaa käytännönläheisesti rakennus- ja teleteknisiin ratkaisuihin.

Sisäkuuluvuuden toteuttamiseen on useita vaihtoehtoja. Ensisijaisesti sisäkuuluvuus pyritään toteuttamaan ulkokeiton, eli käytännössä teleoperaattoreiden makrotukiasemien avulla. Ihanteellisessa tilanteessa sisäkuuluvuuden varmistaminen ei vaatisi lisätoimia. Tämä ei kuitenkaan aina ole mahdollista, jolloin sisäkuuluvuus tulisi varmistaa yhdellä tai useammalla ratkaisulla. Edellä mainitusta jaosta huolimatta tulee sisäkuuluvuuden ratkaisuihin suhtautua kokonaisuutena, sillä vain yhdellä toimenpiteellä ei välttämättä saavuteta tyydyttävää lopputulosta. Lisäksi tulee huomioida, että eri toimenpiteillä voi olla keskinäisiä vaikutuksia. Esimerkiksi teleteknisissä ratkaisuissa aktiivisiin signaalia vahvistaviin laitteisiin tukeutuvat ratkaisut vaativat rakennuksen vaipalta riittävää vaimennusta eli isolaatiota, jotta ulkoverkko ei häiritse rakennuksen sisäverkon sujuvaa käyttöä. Suoraan sisäkuuluvuuden parantamiseksi tehtäviä ratkaisuja voidaan kutsua myös sisätilaratkaisuiksi.

4.1 Rakennustekniset ratkaisut

Rakennusteknisillä ratkaisuilla voidaan joissain tapauksissa ehkäistä rakennuksen vaipan signaalin vaimennuksesta aiheutuvia kuuluvuusongelmia. Rakennusteknisinä ratkaisuinä voidaan pitää materiaalivalintoja, seinien RF-aukkoja sekä rakenteisiin asennettuja antennielementtejä. Rakennustekniset ratkaisut voidaan lukea myös passiivisiin ratkaisuihin, joilla ei itsessään ole signaalia vahvistavia ominaisuuksia. Tämän takia ulkokuuluvuuden tulee olla riittävällä tasolla käytettäessä passiivisia ratkaisuja. Lisäksi ratkaisujen toimivuuteen vaikuttaa myös signaalin tulokulma ja käytettävä taajuusalue, joten signaalitaso ja operaattorin tukiaseman sijainti tulisi olla tiedossa, jos sisäkuuluvuudesta halutaan varmistua etukäteen. [26]

Rakennusteknisillä ratkaisuilla, kuten myös muilla passiivisilla ratkaisuilla saadaan yleensä taattua sisäkuuluvuus yhteen tilaan, jolloin isoissa tai muuten haastavissa rakennuksissa kannattaa varmistaa sisäkuuluvuus muilla tavoin, kuten esimerkiksi sisäantenniverkolla. Tästä huolimatta rakennustekniset ja passiiviset ratkaisut ovat varteen otettavia vaihtoehtoja, sillä ne ovat operaattoririippumattomia, huoltovapaita, vähän tilaa vieviä, eivät tarvitse erillistä tehonsyöttöä ja ne eivät häiritse muita järjestelmiä. [26]

4.1.1 Materiaalivalinnat

Materiaalivalinnoilla voidaan oleellisesti vaikuttaa signaalin vaimenemiseen rakennuksen ulkovaipassa. Eniten rakennuksen vaipassa vaimennusta aiheuttavat erilaiset metallipinnoitteet, jotka heijastavat ja absorboivat sähkömagneettisia kenttiä. Runsaan metallipintojen käytön ansiosta rakennusta voidaan luonnehtia niin kutsutuksi Faradayn häkiksi. Rakennuksen vaipassa yleisimmin metallia käytetään ikkunoiden selektiivipinnoitteissa, ikkunapuitteissa ja -karmeissa, eristeiden pinnalla, rappausverkoissa, betonirauδοituksissa ja metallisissa julkisivupinnoitteissa sekä vesikatteissa. Betoni myös vaimentaa tehokkaasti signaalia, jopa ilman tiheää betonirauδοitusta. [18]

Sisäkuuluvuuden parantamiseksi ilmiselvä ratkaisu olisi vähentää metallin käyttöä rakennuksen ulkovaipassa. Metallipinnoitteiden käytölle on kuitenkin selvät perusteet. Metalliset kalvot ja foliot heijastavat tehokkaasti lämpösäteilyä ja täten ne parantavat rakennuksen lämmöneristävyyttä ja energiatehokkuutta. Vaikka metallia ei suoraan vaadita käytettäväksi, rakentamista ohjaavat energiatehokkuusvaatimukset ovat johtaneet metallipintojen yleistymiseen. Lisäksi metallin määrä voi lisääntyä rakenteissa myös arkkitehtuuristen ja rakennesuunnittelun valintojen myötä. Metallin määrään pystytään kuitenkin vaikuttamaan jonkin verran heikentämättä oleellisesti rakennuksen energiatehokkuutta. Esimerkkinä tästä voidaan pitää taajuusselektiivisiä ikkunoita. [18]

Yhdessä selektiivikalvon ja metallisten karmirakenteiden kanssa selektiivi-ikkunan vaimennus on suuri verrattuna tavalliseen ikkunalasiin ja puukarmeihin. Taajuusselektiivisissä ikkunoissa pieni osa kalvosta poistetaan taajuusselektiivisellä kuvioinnilla (FSS-rakenne), jolloin vaimennus pienenee ilman suurta vaikutusta ikkunan U-arvoon. Ikkunan karmeihin voidaan myös integroida passiivinen antennielementti. Taajuusselektiivisten ikkunoiden harvinaisuuteen on toistaiseksi vaikuttanut niiden kalliimpi hinta. Lisäksi tutkittua tietoa valmiista ikkunaratkaisuista löytyy toistaiseksi vähän. FSS-rakenteita ja passiivisia antennielementtejä voidaan sijoittaa muihinkin rakenteisiin kuin vain ikkunoihin. FSS-rakennetta hyödynnetään myös signaalin tarkoituksenmukaisessa vaimennuksessa, esimerkiksi tehdessä tietoturvallisia tiloja tai kun on tarve eristää ulkoverkko rakennuksen sisäantenniverkosta. Muita keinoja pienentää signaalin vaimennusta ovat esimerkiksi julkisivun tai vesikatteen materiaalin vaihtaminen, lasikuituisen rappausverkon käyttäminen ja metallikalvojen pois jättäminen esimerkiksi eristeistä, jos se vain on mahdollista. [3, 5, 35]

4.1.2 RF-aukko

Rakennuksen vaippaan voidaan myös tarvittaessa tehdä niin kutsuttuja RF-aukkoja, jos muuten metallikalvojen ja folion määrän vähentäminen ei ole mahdollista. RF-aukossa siis rakennukseen jätetään tarkoituksella vähemmän signaalia vaimentava kohta, esimerkiksi jättämällä RF-aukon kohdalta eristeen metallipinnoite pois tai käyttämällä muutoin kevyempää rakennetta. RF-aukot eivät välttämättä ole ongelma rakennuksen energiatehokkuudelle, sillä niiden ei tarvitse olla suuria ja ne voidaan sijoittaa harkiten. Tarvittaessa RF-aukkojen vaikutusta voidaan kompensoida parantamalla muilta osin rakennuksen energiatehokkuutta, jolloin aukkojen vaikutus esimerkiksi rakennuksen E-lukuun voidaan minimoida.

RF-aukkojen suunnittelussa tulee kuitenkin ottaa huomioon radiosignaalien perusilmiöt, eli interferenssi ja taittuminen. Näitä perusilmiöitä selittää Huygens-Fresnel-periaate, jonka mukaan jokainen aaltorintaman kohtaama kulmapiste toimii uuden alkeisaallon lähteenä. Aukon sopiva muoto ja mitoitus määräytyy aallonpituuden perusteella. Aukon tulee olla siis vähintään aallonpituuden suuruinen, jolloin aukon läpi kulkeva aaltorintama voi muodostaa uuden aaltorintaman aukon jälkeen. Tampereen teknillisen yliopiston mittausten perusteella suositeltavana aukkona voidaan pitää leveydeltään vähintään 300 mm:n ja korkeudeltaan 600 mm:n aukkoa, sillä aallonpituuden lisäksi muotoon vaikuttavat kentän polarisaatio ja signaalin tulokulma. RF-aukko voidaan sijoittaa hyvinkin vapaasti, mutta käytännössä luonnollisin paikka sille on ikkunan tai parvekkeen läheisyydessä, koska ihmisillä on tapana hakeutua ikkunan läheisyyteen paremman yhteyden toivossa. Lisäksi RF-aukko voidaan näissä tapauksissa sisällyttää ikkuna- tai ovitoimitukseen. [16, 31]

RF-aukkoja suunniteltaessa on huomioitava rakennuksen ääniympäristöstä annetut asetukset ja meluntorjunta. RF-aukoissa käytetyt kevyet rakennusmateriaalit tyypillisesti vaimentavat melua huonommin kuin vastaava raskaampi seinärakenne. Ääniympäristön vaatimukset ja meluntorjunta voi siis osaltaan asettaa haasteita RF-aukon toteutukselle. Lisäksi elementtirakentamisessa elementtien toistettavuus tuo oleellisen kustannusedun niiden valmistamiseen. Riippuen rakennuksesta, RF-aukotus voi vähentää elementtien toistettavuutta, jolloin valmistuksen kustannustehokkuus kärsii. Tämän takia esimerkiksi sisäantenniverkko voi olla kattavampi ja kustannustehokkaampi ratkaisu toteuttaa kohteen sisäpeitto. [36]

4.2 Teletekniset ratkaisut

Teleteknisillä ratkaisuilla tarkoitetaan yleensä muita kuin rakennusteknisiä ratkaisuja, eli käytännössä suoraan tieto- ja viestintätekniikkaan pohjautuvia ratkaisuja. Vaikka ensisijainen ratkaisu toteuttaa sisäkuuluvuus on ulkopeiton avulla, voidaan teleteknisiin ratkaisuihin päätyä monesta syystä. Syynä voi olla heikko ulkokuuluvuus, rakennuksen suuri vaimennus, sen iso tai muuten hankala muoto sekä jopa sisäkuuluvuuden laiminlyönti rakennushankkeen alkuvaiheessa, jolloin sisäkuuluvuuteen ei voida enää vaikuttaa muilla keinoin.

Teleteknisissä ratkaisuissa on nähtävissä jako täysin passiivisiin ratkaisuihin sekä aktiivilaitteita sisältäviin ratkaisuihin. Yleensä passiiviset ratkaisut sopivat vain yhden tilan ratkaisuksi, kun taas aktiivilaitteilla voidaan saavuttaa yhden tilan tai koko rakennuksen kattava sisäpeitto. Muita jakolinjoja teleteknisille ratkaisuille on jako operaattorin tarjoamien ja käyttäjän omien ratkaisuiden välillä sekä ulkopeitosta riippuviin ja siitä riippumattomiin ratkaisuihin.

Teleteknisissä ratkaisuissa on huomioitava, että aktiivilaitteita saavat omistaa ja hallinnoida vain operaattorit ja muut erillisen luvan saaneet tahot, kuten koulutus- ja tutkimuslaitokset. Lupia ei myönnetä yksityiskäyttöön. Etenkin vikaantuneena tai väärin käytettynä aktiivilaitteet voivat aiheuttaa vakaviakin häiriöitä teleoperaattorien tai viranomaisten käyttämille verkoille. Näin ollen sisäkuuluvuuden varmistaminen teleteknisin ratkaisuin vaatii lähes poikkeuksetta yhteistyötä kiinteistön omistajan ja operaattorien tahoilta. [37]

4.2.1 Operaattorilähtöiset ratkaisut

Operaattorien tulisi pyrkiä optimoimaan tukiasemaverkko yhdessä maankäytön suunnittelun ja kaavoituksen kanssa. Lähtökohtana on tarjota kattava ulkopeitto makrosoluihin perustuen, joka myös samalla palvelee sisäkuuluvuutta rakennuksissa. Ongelmia kuitenkin syntyy, kun rakennuksen ulkovaipan tai massan aiheuttama vaimennus kasvaa oleellisesti totuttuja vaimennuksia suuremmaksi. Tällöin on hyvin mahdollista, ettei sisäkuuluvuus ole enää riittävällä tasolla nykyisellä tukiasemaverkolla. Tukiasemaverkon tiivistäminen tai sen parantaminen muilla tavoin, kuten paremmilla antennilla, on yksi vaihtoehto sisäkuuluvuuden toteuttamiseksi, jolloin rakennusten ulkovaipasta aiheutuvaa vaimennusta pystytään kompensoimaan vahvemalla signaalintasolla.

Arvioimalla kohdekohtaisesti kuuluvuuteen liittyviä riskejä yhdessä operaattorin kanssa, voidaan sisäkuuluvuusratkaisu saavuttaa tukiasematasolla. Yleisesti ottaen tukiasemaverkon tiivistämistä riittävälle tasolle ei ole kuitenkaan nähty vartenotettavana ja kustannustehokkaana ratkaisuna sisäkuuluvuusongelmien ratkaisemiseksi. Esimerkiksi Tampereen teknillisen yliopiston ja Rakennusteollisuus RT:n teknisessä raportissa tiivistämistarve arvioitiin yli 7-kertaiseksi suhteessa nykyiseen tukiasematiheyteen [26].

Makrotukiasemien ja -solujen lisäksi operaattorit voivat käyttää mikrotukiasemia, jotka ovat teholtaan oleellisesti pienempiä ja siten ne on mahdollista sijoittaa esimerkiksi kattolinjan alapuolelle täydentämään makrotukiasemia. Makrotukiaseman peitto on säteeltään parhaimmillaan useita kilometrejä, kun taas mikrotukiasemalla peiton säde on sadoissa metreissä ja lähetysteho enimmillään kymmenen wattia. Joka tapauksessa mikrotukiasemilla on sama ongelma kuin makrotukiasemilla, eli radiosignaalin tulee läpäistä rakennuksen ulkovaippa ja rakennusmassa. [6, 26]

Operaattoreiden on mahdollista tarjota myös pico- ja femto-tukiasemia, eli niin kutsuttuja kotitukiasemia, joiden lähetysteho on huomattavasti pienempi ja peittoalue vain kymmenisen metriä. Tämä Euroopassa yleistynyt palvelu ei ole toistaiseksi rantautunut Suomeen suuressa mittakaavassa ja kotitukiasemia ei ole yleisesti saatavilla työn kirjoittamisen hetkellä. Kotitukiasemien arveltiin yleistyvän jo 4G:n myötä, mutta tätä ei ole toistaiseksi tapahtunut Suomessa, joten nähtäväksi jää, miten 5G tulee vaikuttamaan kotitukiasemien yleisyyteen. [6, 26]

Kotitukiasemaratkaisut ovat kuitenkin aina operaattorikohtaisia, jolloin sisäkuuluvuusongelmaan saadaan ratkaisu vain yhden operaattorin osalta yhdessä kohteessa. Johtuen pienestä lähetystehosta, yksi mikrotukiasema ei riitä kattamaan suurta kiinteistöä, vaan tarvittaisiin useampi tukiasema. Femto- ja pico-solut ovat kuitenkin suhteellisen edullinen ratkaisu käyttäjälle parantaa sisäkuuluvuutta. Alueen kasvaessa ja tarvittaessa palvelua mahdollisesti useammalta operaattorilta, yleensä sisäantenniverkosta tulee vartenotettavampi vaihtoehto sisäkuuluvuuden toteutukselle [26, 38].

Femto-tukiasemissa on ollut Euroopassa tavallisesti toimintatilana suljettu tila (closed mode), joka rajoittaa tukiaseman käytön ennalta määrätyille liittymille, jolloin palvelua voivat käyttää vain tietyt henkilöt. Lisäksi häiriöitä voi syntyä vierekkäisistä tukiasemista ja pahimmillaan tukiasema voi haitata makrosolun toimintaa muiden käyttäjien osalta kohteessa. Puheliikenteen laatua voi heikentää yhteyden vaihtelu eri tukiasemien välillä. Näiden seikkojen vuoksi femto- ja pico-solut nähdään kotitukiasemina, eli yhden talouden tai pientalon ratkaisuna. [26, 31]

Kotitukiasemien lisäksi operaattorit tarjoavat erilaisia VoIP-ratkaisuita (Voice over Internet Protocol) sisäkuuluvuuden parantamiseksi, jolloin puhe muunnetaan digitaaliseen muotoon ja siirretään paketteina kiinteän verkon yli. Yksi vaihtoehto on esimerkiksi Voice over Wi-Fi -puhelut, jotka vaativat yhteensopivan puhelimen, toimivan Wi-Fi-yhteyden sekä palvelun avauksen operaattorilta. Voice over Wi-Fi -ratkaisut tuovat lähinnä käyttäjäkohtaisen ratkaisun ongelmalliseen kohteeseen, sillä kuitenkaan ei ole kannattavaa toteuttaa esimerkiksi julkisen rakennuksen sisäkuuluvuutta, koska viranomaisradioverkon vaatimuksia Wi-Fi-verkolla toteutettu kuuluvuus ei täytä. Wi-Fi verkossa tulee tietoturvan lisäksi kiinnittää erityistä huomiota toimintavarmuuteen ja signaalin laatuun, kun sitä halutaan hyödyntää VoIP-puheluissa onnistuneesti.

4.2.2 Sisäantennijärjestelmä

Sisäantennijärjestelmällä voidaan varmistaa matkaviestinjärjestelmän sisäkuuluvuus kohdekohtaisesti esimerkiksi kerrostaloissa, liikekiinteistöissä, julkisissa rakennuksissa, tuotantotiloissa sekä erityyppisissä tunneleissa ja luolastoissa. Omakoti- ja rivitaloihin sisäantennijärjestelmä on monesti liian monimutkainen ja arvokas ratkaisu.

Sisäantennijärjestelmällä saadaan parannettua peiton lisäksi myös signaalin laatua ja verkon kapasiteettia.

Sisäantennijärjestelmän ajatuksena on toteuttaa rakennuksen sisälle oma matkaviestinverkon solu, joka koostuu kiinteistön passiivisesta sisäantenniverkosta sekä operaattorien tukiasemalaitteista. Sisäantenniverkko voidaan rakentaa joko vain tietyille operaattoreille (DNA, Elisa, Telia Finland tai VIRVE), jokaiselle operaattoreille erikseen tai usealle operaattoreille yhteiseksi. Operaattoreille yhteiseksi rakennetussa sisäantenniverkossa, eli monioperaattorisisäantenniverkossa (MoSi), eri operaattorien tukiasemat yhdistetään samaan verkkoon yhdistelyelementeillä (hybridit ja combinerit). Tarvittaessa operaattori voi liittyä sisäantenniverkkoon myös toistimella, jolloin sisäantenniverkossa ei saavuteta kapasiteettihiotyä. Isoissa rakennuksissa ja laajassa sisäantenniverkossa voidaan joutua käyttämään useampaa solua tai erillisiä vahvistimia verkossa.

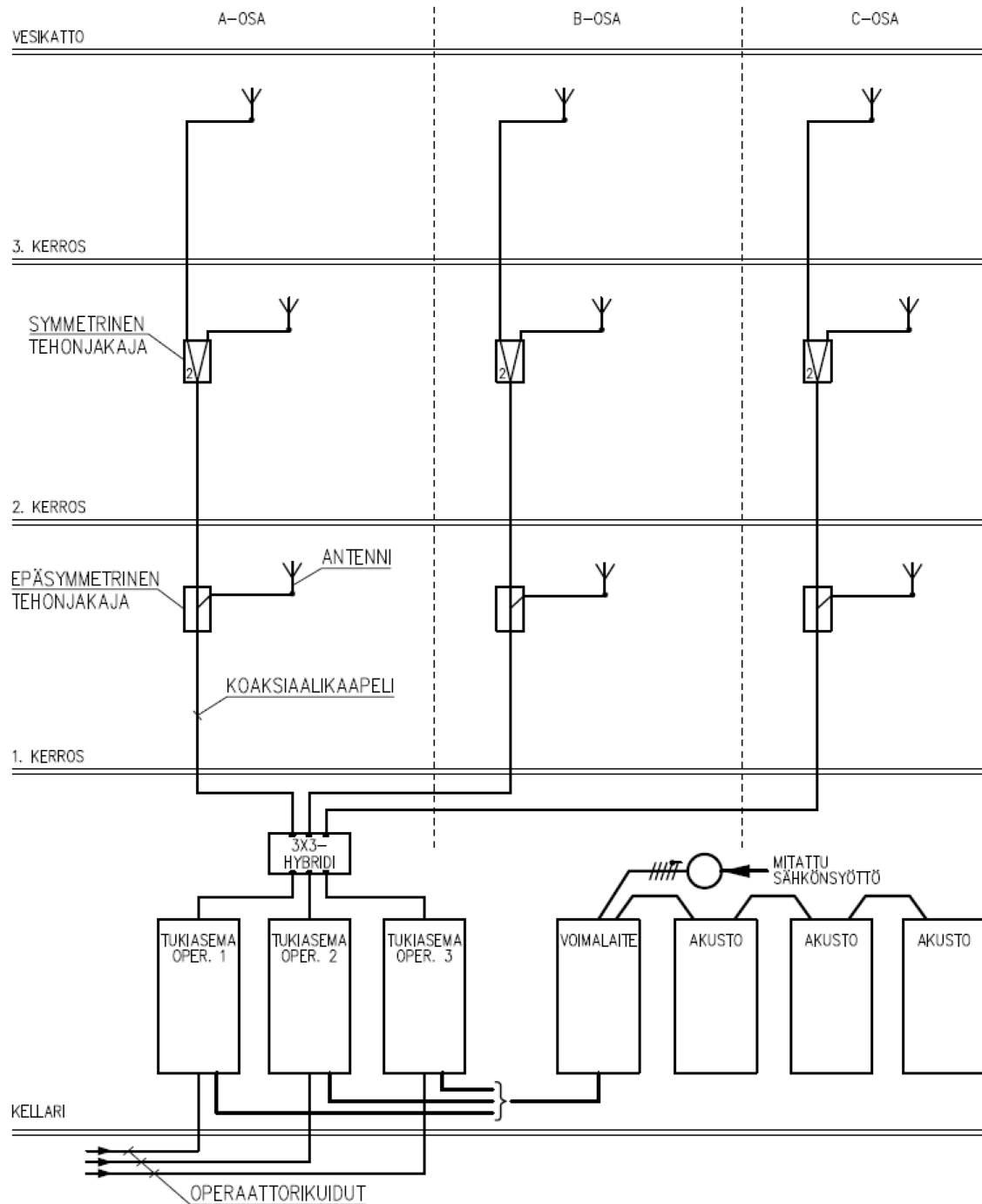
Sisäantenniverkko toteutetaan tavallisesti Single Input Single Output (SISO) -tyyppisesti, mutta sisäantenniverkossa on myös mahdollista hyödyntää MiMo-tekniikkaa (kaksoissyöttö). MiMo-tekniikan hyödyntäminen tarkoittaa käytännössä vähintään sisäantenniverkon kahdentamista, sillä sitä varten tarvitaan kaksi toisistaan erillistä siirtotietä. Tarvittaessa sisäantenniverkko voidaan tehdä osittain tai kokonaan redundanttiseksi turvallisuussyistä, vaikka MiMo-tekniikkaa ei hyödynnetä.

Sisäantenniverkko voidaan toteuttaa hajautetulla antennijärjestelmällä (DAS) tai säteilevällä koaksiaalikaapelilla, myös näiden yhdistelmä on mahdollinen. Yleisesti sisäantenniverkosta käytetään myös DAS-nimitystä. Kuvassa 2 on kaavioesitys tyypillisestä sisäantenniverkon periaatteesta. Pääosiltaan sisäantenniverkko koostuu operaattorien tukiasemista, varmennetusta sähkönsyöttölaitteistosta, yhdistelyelementeistä, koaksiaalikaapeleista, symmetrisistä ja epäsymmetrisistä tehonjakajista sekä antenneista tai vuotavasta kaapelista. Sisäantenniverkon komponentit tulee valita yhteensopiviksi käytettävien taajuualueiden ja teknologioiden perusteella.

Säteilevä koaksiaalikaapeli päästää radiosignaalin läpi ulkovaipan pienistä rei'istä, joten se toimii itsessään antennina. Säteilevä kaapeli soveltuu hyvin esimerkiksi pitkille käytäville tai tunneleihin, joissa peiton toteuttaminen tavallisilla antennielementeillä olisi haastavaa. Säteilevä kaapeli tulee eristää riittävällä tasolla metallirakenteista, kuten kaapelihyllyistä ja muista kaapeleista.

Hyvin suunniteltuna ja toteutettuna sisäantenniverkolla saavutetaan kattava ja luotettava sisäpeitto. Yksi sisäantenniverkon hyvistä puolista on se, että käyttäjän hallinnoima passiivinen verkko on suhteellisen huoltovapaa. Haittapuolena on kuitenkin verkosta aiheutuvat ylimääräiset investointikustannukset käyttäjälle. Lisäksi operaattoreille aiheutuu kustannuksia sisäantenniverkkoon liittymisestä ja juoksevia kustannuksia tukiaseman ylläpidosta. Sisäantenniverkon palvelun laatua voi huonontaa liiaksi sisälle vuotava ulkopeitto, jos päätelaite vaihtelee jatkuvasti yhteyspistettä sisäantenniverkon ja ulkoverkon välillä.

Teknologioiden vanheneminen voi asettaa tulevaisuudessa päivitystarpeita sisäantenniverkoille. Esimerkiksi 5G:n 3,5 GHz:n taajuusalueen käyttöönotto voi aiheuttaa liian suuria vaimennuksia antenniverkon kaapeloinnissa. Tämän lisäksi 5G:n moniantennihiötyjä ei pystytä hyödyntämään suurimmassa osassa nykyisiä sisäantenniverkkoja.



Kuva 2: Esimerkkikaavioesitys rakennuksen monioperaattoriverkosta. [37]

Tarkempia ohjeita sisäantenniverkon suunnittelusta on annettu muun muassa ST-kortissa ST 625.10 Matkaviestinjärjestelmien sisäantenniverkot [37]. Periaatteena sisäantenniverkossa on jakaa teho mahdollisimman tasaisesti kaikkien antennien välillä. Tämä voi olla osittain vaikeaa pelkällä säteilevällä kaapelilla, jolloin kaapelin alkupään teho voi olla oleellisesti suurempi kuin loppupäässä. Tasaisella tehonjaolla varmistetaan

riittävä teho jokaiselle antennille, mutta samalla huolehditaan, että pysytään antennille säteilyturvallisuudesta annetun ohjeistuksen (STUK) enimmäisradiosäteilyarvojen rajoissa. Tähän tavoitteeseen päästään tehokkaalla peittosuunnittelulla ja huolellisella komponenttien valinnalla [27]. Pyrittäessä mahdollisimman tasaiseen tehonjakoon, tulee antenniverkosta tehdä mahdollisuuksien mukaan tähtimäinen ja lisäksi tulee varmistua, että kaikki lähdöt yhdistelyelementeiltä tulee käytettyä.

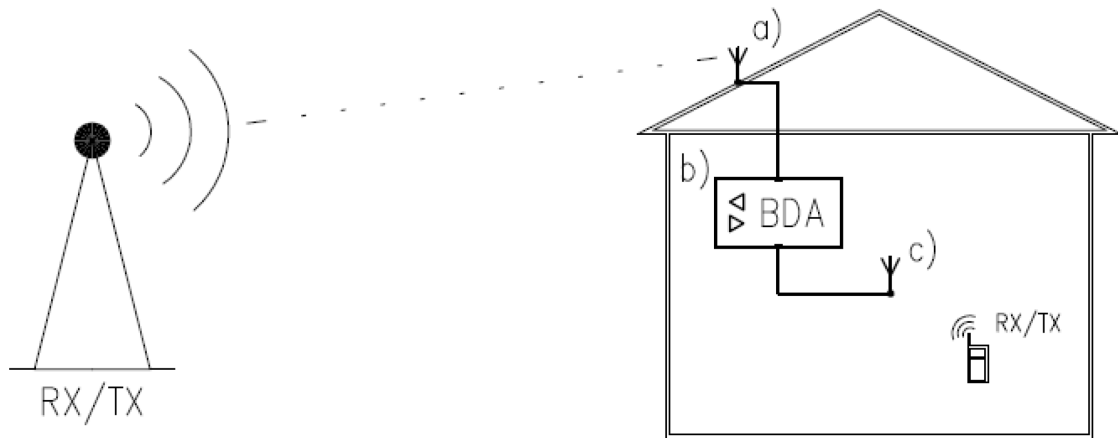
Tärkeänä osana sisäantenniverkon suunnittelua on linkkibudjettilaskelma, jolla varmistetaan molempien siirtosuuntien toiminta halutulla alueella. Laskelmassa tulee huomioida verkon kaikkien sisäantenniverkon komponenttien vaimennus sekä myös antennien ja päätelaitteen välinen radiotie, jossa signaalin välittäjäaineena on ilma. Linkkibudjetissa on siis syytä laskea vaimennukset ja lopulliset tehot kaikille antennille. Linkkibudjetin lisäksi laskelmiin on hyvä sisällyttää ylälinkin kohinalaskelma, jolla varmistetaan, ettei kohinataso nouse liian suureksi suhteessa päätelaitteen vastaanottamaan signaaliin.

Sisäantenniverkossa tulee kiinnittää erityistä huomiota käytettävien komponenttien ja liitosten laatuun sekä antennien sijoitteluun. Näin pystytään minimoimaan passiivisesta keskeismodulaatiosta aiheutuva häiriöt, eli PIM-häiriöt. Suuri merkitys on etenkin signaalin yhdistimellä. Passiivista keskeismodulaatiota on havaittu tapahtuvan juuri sisäantenniverkon passiivisissa komponenteissa, joissa katsotaan olevan lineaarinen yhteys sisään- ja ulostulolla. Signaalin yhdistimien lisäksi PIM-häiriöitä voi syntyä esimerkiksi huonoissa liitoksissa ja huonosti valituista sisäantennien sijoituspaikoista. Tarpeeksi suurella lähetysteholla passiiviset komponentit luovat ylimääräisiä taajuuskomponentteja, jotka saattavat osua lähellä oleville operaattorien taajuusalueille häiriten palvelua. Passiivisten komponenttien lisäksi antennien läheisyydessä olevien johtavien osien tuottamat PIM-häiriöt voivat olla jopa merkittävämpiä. Erityisesti ongelmallista on, jos passiivisen keskinäismodulaation ylimääräisen taajuuskomponentin teho on suurempi, kuin sen häiritsemän signaalin teho. Tämä voi olla mahdollista, jos vastaanotokaistalle osuu toisen systeemin lähetyksestä syntynyt keskinäismodulaation tulos. [27, 39]

Radiotekniikan ja säteilyturvallisuuden lisäksi sisäantenniverkkoa suunniteltaessa tulee huomioida järjestelmän asianmukainen maadoitus ja potentiaalintasaus, tietoturva, laittilojen lukitus ja kulunvalvonta sekä paloturvallisuus. Viestintäviraston antamia määräyksiä ja suosituksia sisäverkoista ja teleurakoinnista sekä laittilojen lukituksesta voidaan soveltuvin osin hyödyntää myös sisäantenniverkon suunnittelussa.

4.2.3 Aktiiviset toistimet

Toistinratkaisuja voidaan käytännössä luonnehtia kaksisuuntaisiksi vahvistimiksi (BDA), joiden avulla vahvistetaan tulevaa ja lähtevää signaalia. Toistimissa on ulkoantenni signaalin vastaanottoa ja lähetystä varten suhteessa muuhun verkkoon, kaksisuuntainen vahvistin ja yksi tai useampi sisäantenni signaalin vastaanottamiseksi ja lähettämiseksi esimerkiksi rakennuksen sisätiloissa. Aktiivisen toistinjärjestelmän toimintaperiaate on esitetty kuvassa 3. Käytännössä toistin on siis yhteydessä operaattorin muuhun verkkoon radioteitse. Sisäantennit voivat olla toteutettu hajautetulla antennijärjestelmällä tai säteilevällä kaapelilla. Toistimia käytetään alueilla, joissa operaattorin verkon peitto on heikko tai rakennuksen signaalin vaimennus on suuri. Toistimet vahvistavat signaalia, joten ne luetellaan aktiivilaitteiksi ja siten niiden käyttö on luvan varaista [11]. Yleensä käytetyt toistimet ovat operaattorin hallinnoimia.



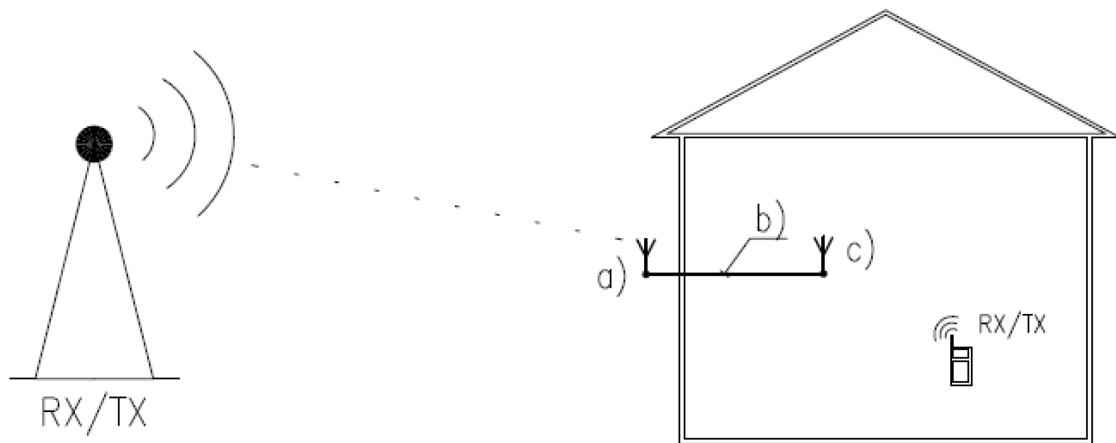
Kuva 3: Aktiivisen toistimen toimintaperiaate, jossa tärkeimmät komponentit ovat a) ulkoantenni, b) toistin ja c) sisäänantenni.

Toistimet voidaan jakaa edelleen analogisiin ja digitaalisiin toistimiin. Analogiset toistimet toistavat tietyn taajuusalueen signaalin, jolloin ne toistavat myös taajuusalueella esiintyvän kohinan ja häiriöt, mutta eivät aiheuta viivettä signaalille. Analogiset toistimet ovat siis hyvin riippuvaisia saapuvan signaalin laadusta. Digitaaliset toistimet puolestaan antavat paremmat hallintamahdollisuudet toistettavan signaalin suhteen, joka on johtanut myös niiden yleistymiseen. Digitaaliset toistimet voivat olla regeneroivia, eli ne purkavat saapuvan signaalin ja luovat lähetettävän signaalin uudelleen. Tällöin kohinaa ja häiriöitä voidaan suodattaa signaalista pois, mutta samalla toistimessa syntyy viivettä. Viiveen lisäksi toistimet voivat aiheuttaa häiriötä muille verkoille, jos ne toimivat samalla taajuusalueella tai päätelaite joutuu vaihtelevaan kahden verkon välillä. Toistimia on markkinoilla erilaisiin käyttötarkoituksiin. Toistimet voivat olla yksilöityä tietylle taajuusalueelle tai siirtotekniikalle, kun taas saatavilla on myös useampia taajuusalueita ja tekniikkoja tukevia toistimia. [3]

Toistimet ovat vaihtoehtoinen ratkaisu tukiasemalla toteutetun sisään antenniverkon ohella ja niitä onkin ehdotettu ratkaisuksi rakennusten kuuluvuusongelmiin. Toistimen käytössä on kuitenkin omat haasteensa, sillä toistimelle tarvitaan sopivat antennipaikat rakennuksen ulkopuolella ja riittävä tilavaraus sisäpuolelle vahvistinta varten. Lisäksi rakennuksessa tulee löytyä kaapelireitit ja asennuspaikat myös sisään antennien asentamiseksi, joka voi olla erityisen haastavaa korjausrakentamiskohteissa. [3]

4.2.4 Passiiviset antenniratkaisut

Passiivisessa antenniratkaisussa ulko- ja sisätilan välillä on suora antenniyhteys, jonka kautta radiosignaali voidaan siirtää vaimentavien rakenteiden lävitse. Passiivisen antenniratkaisun toimintaperiaate on esitetty kuvassa 4. Passiivisia antenniratkaisuja nimitetään usein myös passiivisiksi toistimiksi, sillä sen toimintaperiaate muistuttaa paljon myös aktiivista toistinta, jossa signaalit siirretään verkon ja rakennuksen välillä radioteitse ja tuodaan antennikaapelilla rakennukseen sisään. Passiivinen antenni voidaan sijoittaa erikseen talon seinärakenteisiin tai katolle. Antennielementit voidaan myös tarvittaessa integroida rakenteisiin, kuten esimerkiksi osaksi valmiin ikkunan karmirakennetta. Tällöin antenniratkaisu voi olla hyvin huomaamaton ja vaivaton asentaa muiden rakennustöiden yhteydessä.



Kuva 4: Passiivisen antenniratkaisun toimintaperiaate, jossa tärkeimmät komponentit ovat a) ulkoantenni, b) antennikaapeli ja c) sisäantenni.

Pelkkä passiivinen antenniratkaisu ei tarvitse sähkönsyöttöä, mutta se ei myöskään todellisuudessa vahvista signaalia. Verrattaessa kuitenkin tilanteeseen ilman antenniratkaisua on signaalintaso sisäantennin läheisyydessä oleellisesti voimakkaampi. Ideaalitapauksessa passiivinen antenniratkaisu välittäisi radiosignaalin rakennuksen sisälle sellaisenaan, mutta todellisuudessa antennielementeissä ja välikaapeloinnissa syntyy häviöitä.

Passiivisen antenniratkaisun etuja ovat sen yksinkertaisuus, edullisuus ja operaattoririippumattomuus, eikä sen käyttöönottoon tarvita erillistä lupaa. Toisaalta passiivisen antenniratkaisun tarjoama kuuluvuus voi olla hyvin vaihtelevaa ja rajattua toteutustavan mukaan. Passiivinen antenniratkaisu on hyvin riippuvainen etenkin operaattorien tarjoaman verkon ulkopeitosta. Yleensä passiivisen antennin luoma kuuluvuus on kohtuullisella tasolla vain lähellä antennia, eikä sen peittoalue ylety kovin pitkälle kyseiseen tilaan, kokonaisuudesta huoneistosta tai rakennuksesta puhumattakaan, joten se nähdään enimmäkseen yksittäisen tilan ratkaisuna. Esimerkiksi passiivista antenniratkaisua käytetään yleensä turvaamaan viestintä- ja teleyhteydet rakennusten väestönsuojissa.

Passiiviseksi antenniratkaisuksi voidaan lukea myös ratkaisut, joissa päätelaitteelle tuodaan erillinen ulkoantenni. Päätelaite voi tässä tapauksessa olla mobiiliverkkomodeemi tai niin kutsuttu GSM-pöytäpuhelin, jolloin niitä ei lueta kiellettyihin aktiivilaitteisiin. Mobiiliverkkomodeemi tuottaa signaalin langattomalle lähiverkolle (WLAN) varatuilla taajuuksialueilla, kun taas GSM-pöytäpuhelimessa on kyse verkon tavallisesta päätelaitteesta. Tämän kaltainen ratkaisu ei sovellu kuitenkaan suoraan matkapuhelimelle, mutta mobiiliverkkomodeemin kautta voidaan käyttää esimerkiksi Voice over Wi-Fi -palvelua. Ulkoantenni voidaan sijoittaa ikkunalaudalle tai jopa talon antennimastoon ja suunnata tukiasemaa kohden. Kustannukset riippuvat pitkälti valitusta antennista ja asennuspaikasta. Tämä ratkaisu niin ikään koetaan ratkaisuksi yksittäiseen kohteeseen, kuten esimerkiksi pientaloon. [5]

5. Sisäkuuluvuus rakennushankkeessa

Tässä luvussa käsitellään rakennushankkeen keskeisiä osia ja rakentamista sisäkuuluvuuden kannalta. Rakennushanke on laaja sekä paljon käsitelty aihe, joten tässä luvussa on tarkoituksena antaa lukijalle yleiskuva rakennushankkeesta, toteutusmuodoista ja sisäkuuluvuuden huomioimisesta hankkeessa.

5.1 Rakennushanke

Rakennushankkeet ovat hyvinkin vaihtelevia ja moninaisia. Voidaan jopa sanoa, että yksikään rakennushanke ei ole toisen hankkeen kanssa täysin identtinen. Rakennushankkeeseen vaikuttavat oleellisesti kohteen sijainti, käyttötarkoitus, rakennustapa sekä onko kyseessä uudis- vai korjausrakennuskohde. Aikataululla voi myös olla olennainen vaikutus hankkeen etenemiseen. Rakennushankkeen toteutusmuoto ja vaiheet riippuvat siis pitkälle rakennuskohteesta ja hankkeen luonteesta. Tästä huolimatta rakennushankkeista löytyy myös paljon yhdistäviä tekijöitä etenkin projektin suunnittelun ja ohjauksen tasolla. Rakennushankkeissa on nähtävissä niitä yhdistäviä tyypillisiä tehtäväkokonaisuuksia, jotka toistuvat eri rakennushankkeissa, mutta joiden sisältö muuttuu. Rakennushankkeita yhdistäviä tekijöitä ovat myös rakentamista koskevat säännökset ja muut velvoitteet, joiden toteutumista valvoo esimerkiksi rakennusvalvontaviranomainen.

Rakennushankkeessa on hahmotettavissa yleensä kolme keskeistä tehtävää: rakennuttaminen, suunnittelu ja rakentaminen. Rakennushanke lähtee yleensä käyntiin, jos organisaation toiminnan ja tilojen yhteensopimattomuuden takia päädytään uudis-, lisä- tai korjausrakentamiseen. Vaihtoehtona rakentamiselle on myös organisaation rakenteissa tehtävät muutokset, kuten tehostaminen sekä valmiiden tilojen ostaminen tai vuokraaminen. Yleensä organisaation koko ja erityisvaatimukset vaikuttavat valmiiden tilojen saatavuuteen. Huomioitavaa on, että rakennuksen omistaja ja käyttäjä eivät ole välttämättä samasta organisaatiosta, jolloin omistajalla ja käyttäjällä on todennäköisesti eriävät näkökulmat ja odotukset. Tällöin myös mahdollisen omistajan ja käyttäjän näkökulmien tulee kohdata, jotta rakennushanke on kannattava käynnistää. Huomioitavaa on myös, että omistajan ei tarvitse itse huolehtia kaikista rakentamiseen liittyvistä tehtävistä, vaan rakennuttajan tehtäviä hoitamaan voidaan palkata esimerkiksi ulkopuolinen konsultti.

Rakennushankkeen kulkua on käsitelty RT-kortissa RT 10-11256 Talonrakennushankkeen kulku, yleistä [40]. Kortti toimii johdantona talonrakennushankkeen kulku -ohjesarjaan ja siihen on koottu myös muut rakennushankkeeseen liittyvät kortit. Tämän lisäksi rakennushankkeille tyypillisiä tehtäväkokonaisuuksia on koottu eri aloille tehtäväluetteloiksi, joiden perusteella hankkeen suunnittelutehtävien sisällön ja laajuuden määrittelemine on selkeää. Samalla tehtäväluettelosta on hahmotettavissa rakennushankkeen kaari sen alusta loppuun. Talonrakennusta koskevat taloteknisten järjestelmien suunnittelun tehtäväluettelo on koottu RT-korttiin RT 10-11290 Taloteknisen suunnittelun tehtäväluettelo TATE18 [41]. RT-kortin mukaiset rakennushankkeen aikaiset tehtäväkokonaisuudet ja niiden perusteella syntyvät tärkeimmät päätökset on koottu taulukkoon 6 hankkeen etenemisjärjestyksessä.

Taulukko 6. Hankkeen tehtäväkokonaisuudet ja päätökset etenemisjärjestyksessä. [41]

Tehtäväkokonaisuus	Päätös
A Tarveselvitys	Hankepäätös
B Hankesuunnittelu	Investointipäätös
C Suunnittelun valmistelu	Suunnittelun käynnistäminen
D Ehdotussuunnittelu	Valittu ehdotussuunnitelma
E Yleissuunnittelu	Hyväksytty yleissuunnitelma ja pääpiirustukset
F Rakennuslupatehtävät	Rakennuslupa
G Toteutussuunnittelu	Hyväksytyt toteutussuunnitelmat
H Rakentamisen valmistelu	Rakentamispäätös
I Rakentaminen	Vastaanottopäätös
J Käyttöönotto	Rakennuksen käyttöönottaminen
K Takuuaika	

Rakennushankkeen läpivienti tarvitsee monipuolista osaamista ja eri alojen ammattilaisia. Etenkin hyvin onnistuneessa hankkeessa eri alojen ammattilaisten välinen yhteistyö korostuu. Sähkösuunnittelijan näkökulmasta olennaisia sidosryhmiä rakennushankkeessa ovat tilaaja ja rakennuttaja, käyttäjät, viranomaiset, muiden alojen suunnittelijat sekä urakoitsijat ja laitetoimittajat. Monesti sähkösuunnittelijan toimintaympäristö rakennushankkeessa voi olla hyvinkin haastava, sillä sähkösuunnittelun tulisi tukea arkkitehtuuria ja muita suunnittelualoja, mutta samalla tulisi huomioida kokonaisuus ja loppukäyttäjän tarpeet, tietysti rakennuttajan intressejä unohtamatta. Sähkösuunnittelijan näkökulmasta on huomion arvoista, että suunnittelijalla on tavallisesti suunnittelu- ja koordinoitavuudellaan myös erittäin laaja kirjo erilaisia sähkö- ja tietoteknisiä järjestelmiä, joista sisäkuuluvuus ja sisäverkot ovat vain yksi järjestelmä (*niche*), joka voi jäädä helposti liian vähälle huomiolle hankkeessa.

Rakennushanke on myös yleisesti ottaen projektina luonteeltaan hyvin haastava, sillä toistettavuutta on eri hankkeiden välillä suhteellisen rajatusti, verrattuna muihin tuotantoprojekteihin. Tämän lisäksi eri alojen ja järjestelmien lukumäärä on huomattava. Projektinjohdon, kuten rakennuttajan, lisäksi suunnittelijoilla on oma vastuunsa projektin taloudellisesta onnistumisesta. Suunnittelussa tehdyillä ratkaisulla on yleensä iso vaikutus rakennushankkeessa syntyvien kustannusten osalta. Suurin osa rakennushankkeen kustannuksista määräytyy jo tarveselvityksen ja hankesuunnittelun aikana, jolloin myöhemmissä suunnitteluvaiheissa on enää hyvin rajalliset mahdollisuudet vaikuttaa rakennushankkeen kokonaiskustannuksiin. Tämän perusteella rakentamisen aikana tehtävillä ratkaisulla on enää häviävän pieni vaikutus suhteessa rakennushankkeen kokonaiskustannuksiin.

Tilaajan tai rakennuttajan vastuulla on tarjota riittävät lähtötiedot sekä vaatimustaso ja reunaehdot rakennushankkeelle ja suunnittelulle. Ilman riittävää määrittelyä haluttuun lopputulokseen pääseminen voi osoittautua hyvinkin hankalaksi. Suunnittelun tilaavan tahon vastuulla on myös huolehtia suunnittelun koordinoinnista ja suunnitelmien yhteensovittamisesta. Yleensä arkkitehti toimii hankkeen pääsuunnittelijana ja LVI-suunnittelija talotekniikan pääsuunnittelijana, joten heillä tulisi olla myös rooli suunnitelmien yhteensovittamisessa. Riittävän tarkka määrittely tilaajan taholta sekä tarvittava koordinointi ovat olennaisessa osassa sisäkuuluvuushanketta, jos sisäkuuluvuus haluttuun onnistuneesti ja kustannustehokkaasti.

5.2 Rakennushankkeen toteutusmuodot

Rakennushankkeille on vakiintunut tyypilliset toteutusmuodot. Riippuen rakennuskohteesta, hankkeen luonteesta ja sille asetetuista tavoitteista, on järkevää käyttää hankkeelle sopivinta toteutusmuotoa. Toteutusmuodot on jaettu erilaisiin suunnittelu- ja urakkamuotoihin, jotka määrittelevät tilaajan, suunnittelijan sekä urakoitsijan välisiä suhteita ja sopimuksia.

Rakennushankkeissa yleisesti käytettyjä toteutusmuotoja ovat:

- kiinteähintainen urakka
- tavoitehintaurakka
- projektinjohtourakka
- kokonaisvastuurakentaminen
- yhteistoiminnalliset toteutusmuodot (esim. allianssi).

Rakennushankkeessa eri toteutusmuodot voivat vaikuttaa hyvinkin paljon hankkeen osapuolten keskinäisiin suhteisiin ja sopimuksiin. Yleisesti ottaen rakennushankkeessa sopimusten lukumäärä voi olla hyvinkin mittava. Vaikka rakennusalalla on vakiintuneet käytännöt ja urakoitsijoita sekä suunnittelijoita sitovat yleiset sopimusehdot, niin tästä huolimatta sopimusrakenteissa löytyy päällekkäisyyksiä. Lisäksi sopimusrakenteista ja taloudellisista syistä johtuen eivät kaikkien osapuolten intressit aina kohtaa hankkeen aikana. Tämän takia rakennusala voidaan luonnehtia jopa riitaisaksi.

Projektinhallinnan ja sopimusteknisten syiden takia pääurakoitsijoita on yleensä hankkeessa rajatusti. Tällöin erikoisosaamista vaativat työt teetetään tavallisesti sivu- tai aliurakkana. Suunnittelussa on myös mahdollista teettää erityistä asiantuntemusta tai mitta- ja työvälineitä vaativat tehtävät alikonsultointina.

5.3 Menettelytapasuositukset

Rakennustietokortissa RT 80-11252 Matkaviestintäkuuluvuus rakennuksissa [18] käsitellään matkaviestimien sisäkuuluvuusongelmien mahdollisia syitä ja ratkaisumalleja rakennusten osalta. Tämän lisäksi kortissa on annettu menettelytapasuositukset uudis- ja korjausrakentamisessa, joilla voidaan yrittää ennakoida sisäkuuluvuusongelmia todennäköisyyttä ja siten tarvittaessa ryhtyä tarvittaviin toimenpiteisiin kuuluvuusongelmien ehkäisemiseksi. Sisäkuuluvuuteen vaikuttavia tekijöitä on kuitenkin useita, jolloin niiden yhteisvaikutuksen arvioiminen voi olla haastavaa ja vaatii riittävää asiantuntemusta.

Uudiskohteessa suositellaan ensiksi otettavan operaattoreihin yhteyttä tulevasta rakennuskohteesta. Tämän jälkeen voidaan suorittaa rakennuspaikalla alustavat kentänvoimakkuuksien mittaukset eri operaattorien verkoille. Seuraavaksi selvitetään kohteen erityisvaatimukset sekä tarvittava sisäpeiton laajuus rakennuksen eri tiloissa tulevan käyttäjän toiminnan perusteella. Tämän jälkeen voidaan arvioida kohteen oman rakennusmassan ja vaimennusominaisuuksien sekä kohdetta mahdollisesti ympäröivien rakennusten vaikutus kentänvoimakkuuteen, jonka perusteella tehdään arvio sisäkuuluvuusongelmien todennäköisyydestä uudiskohteessa. [18]

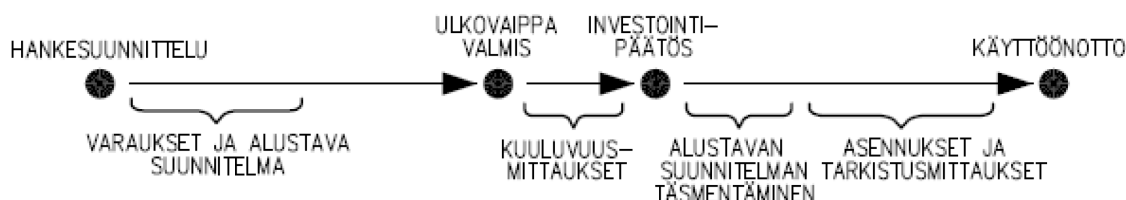
Korjausrakentamisessa puolestaan voidaan olettaa sisäkuuluvuusongelmien ennakoinnin olevan helpompaa rakennustoimenpiteen perusteella, sillä muuttujia on yleensä vähemmän. Korjausrakentamiskohteissa voidaan ensiksi suorittaa nykyisellään mittaukset rakennuksen sisätiloissa. Tämän jälkeen tehdään arvio tarvittavasta sisäpeiton laajuudesta ja huomioidaan mahdolliset erityisvaatimukset. Seuraavaksi selvitetään rakennustoimenpiteen ja rakennusmateriaalien arvioitu vaimennusvaikutus, jonka perusteella tehdään arvio sisäkuuluvuusongelmien todennäköisyydestä korjausrakentamiskohteissa. Lisäksi korjausrakentamisessa tulee tarpeen mukaan huomioida muutokset ympäröivässä rakennuskannassa. [18]

5.4 Sisäkuuluvuuden huomioiminen rakennushankkeessa

Matkaviestinten sisäkuuluvuuden huomioimisesta rakennushankkeessa on tullut entistä tärkeämpää kasvaneiden taajuusalueiden sekä kiristyneiden energia- tehokkuusvaatimusten myötä, koska sisäkuuluvuusongelmat ovat entistä todennäköisempiä. Etenkin pyrittäessä matala- ja nollaenergiarakentamiseen tai käytettäessä muuten runsaasti metallia ja metallikalvoja sisältäviä rakenteita, nousee sisäkuuluvuusongelmien todennäköisyys huomattavasti. Sisäkuuluvuusongelmat voidaan luokitella kohdekohtaisiksi ja ongelmiin on olemassa useita ratkaisuvaihtoehtoja, joten sisäkuuluvuus tulisi huomioida myös rakennushankkeissa aina kohdekohtaisesti. Esimerkiksi joissain hankkeissa käytetty ratkaisu ei välttämättä sovellu sellaisenaan tuleviin hankkeisiin. [18]

Menettelytapasuosituksia ja ohjeita matkaviestinkuuluvuudesta rakennuksissa on annettu rakennustietokortissa RT 80-11252 sekä ohjeita sisäverkkojen suunnittelusta ja rakentamisesta sähkötietokortissa ST 625.10. Sisäverkkoratkaisua ei kuitenkaan tarvita läheskään kaikkiin rakennuskohteisiin, joten erillisen sisäverkkoratkaisun tarpeellisuuden määrittely on oleellisessa osassa rakennushanketta. RT-kortin menettelytapasuosituksissa voidaan todeta myös kuuluvuuskartoitusten ja -mittausten olevan keskeisessä roolissa arvioitaessa sisäkuuluvuusongelmien todennäköisyyttä. Yksinkertaisimmillaan mittauksia voidaan suorittaa soittamalla puheluita ja käyttämällä datapalveluita kohteessa, mutta tarkkaan arvioon tulisi käyttää aina mittaukseen tarkoitettua laitteistoa ja ammattitaitoista asiantuntijaa. Tämän lisäksi rakennuksen käyttö, mahdolliset erityisvaatimukset ja vaimennusominaisuudet tulee olla riittävällä tarkkuudella tiedossa, kun arvioidaan kuuluvuutta. [18, 37]

Mittaustulokset ja niiden perusteella tehdyt arviot eivät kuitenkaan takaa sisäkuuluvuutta, sillä rakennuksen tai ympäröivien rakennusten vaimennusominaisuudet voivat muuttua rakentamisen aikana tai sen jälkeen sekä operaattorit voivat vaihtaa tukiasemien sijaintia, joten lopullinen kuuluvuus on monesti tiedossa vasta valmiissa kohteessa tiettyinä ajankohtana. Tämän takia rakennushankkeessa tulisi aina varautua vähintään tilavarauksin esimerkiksi sisääntenniverkon rakentamiseen, jos se vain suinkin on mahdollista. Samasta syystä mittaukset monesti halutaan tehdä vasta, kun rakennuksen ulkovaippa on valmis, jotta niitä voidaan käyttää mahdollisten investointipäätösten tukena. Kuvassa 5, on esitetty rakennushankkeen aikajana, kun rakennuksen sisäkuuluvuus ja sisääntenniverkon investoinnin tarpeellisuus halutaan varmistaa mittaamalla. Kuuluvuuskartoitusta ja -mittauksia lukuun ottamatta sisäverkkohankkeen eteneminen muistuttaa muilta osin rakennushankkeen tyypillistä etenemistä. Sisääntenniverkon investointipäätöksen viivyttäminen onkin hyvin epätyypillistä verrattuna muihin rakennushankkeissa tehtäviin investointipäätöksiin, jotka tehdään yleensä jo hankesuunnitelman pohjalta.



Kuva 5. Kuuluvuusmittaus investointipäätöksen tukena rakennushankkeessa. [42]

Mittausten ja sisätilaratkaisun investointipäätöksen suorittaminen ulkovaipan valmistumisen jälkeen voi sisältää riskejä rakennushankkeen näkökulmasta. Ulkovaipan valmistuttua työmaa on monesti jo hyvin pitkällä ja esimerkiksi sisäantenniverkon rakentamisen suhteen voi päätös tulla liian myöhäisessä vaiheessa. Esimerkiksi kaapelointi voi olla oleellisesti hankalampaa, kun alakatot, läpiviennit ja palokatot ovat jo valmiita. Lisäksi käyttöönoton lähestyessä asennustyön kiirehtimisestä seuraa omat lisäkustannuksensa. On myös olemassa riski, että ulkovaippa ei kaikesta huolimatta vastaa vaimennusominaisuuksiltaan lopullista, jolloin mittausten perusteella päädytään todennäköisesti väärään lopputulemaan. Hyvin koordinoituna ja ennakoituna sisäantenniverkon rakentaminen on mahdollista oikea-aikaisesti myös ulkovaipan valmistuttua, kunhan järjestely on huomioitu myös muutoin rakennushankkeessa. Tilanne on myös mahdollinen, jossa rakennuksen sisäverkon isolaatio ei välttämättä ole riittävä, jolloin ulkopeitto niin sanotusti vuotaa rakennukseen sisään ja mahdollisesti häiritsee palveluntasoa sisäverkossa.

Sisäkuuluvuuden asianmukainen huomioiminen vaatii aina yhteistyötä hankkeen eri osapuolten kesken. Tilaajalta tulee tarvittaessa saada riittävät lähtötiedot kohteesta, jonka pohjalta voidaan yhdessä rakennuttajan tai käyttäjän kanssa kartoittaa tarvittava laajuus sisäpeitolle sekä huomioida kohteen muut erityisvaatimukset. Tämän lisäksi suunnitteluryhmän kesken yhteistyö ja tiedonvaihto on merkittävässä roolissa, esimerkiksi rakennuksen vaimennusominaisuuksien ja tarvittavien tilavarausten osalta. Operaattorien kanssa on myös syytä aina käydä vuoropuhelu liittyen rakennuksen sisäkuuluvuuteen. Sisäkuuluvuutta ei kuitenkaan huomioida läheskään aina rakennushankkeissa. Yhtenä syynä voi olla, että hankkeessa ei ole mukana asiantuntijaa, kuten sähkösuunnittelijaa, riittävän aikaisessa vaiheessa hanketta tai muuten hankkeessa ei tarvittaisi sähkösuunnittelijaa. Esimerkiksi vaihdettaessa korjausrakentamiskohteessa ikkunaremontin yhteydessä vain uudet energiatehokkaat ikkunat, ei välttämättä osata varautua, että toimenpiteellä on oleellisesti vaikutusta energiatehokkuuden lisäksi myös sisäkuuluvuuteen, eli ei osata pyytää asiantuntijan arviota tilanteeseen. Juurikin ikkunat ovat olleet radiosignaaleille tärkeä reitti rakennuksen sisätiloihin.

Viranomaisradioverkon sisätilaratkaisun toteuttamiseen voidaan päätyä kolmea tavalla: viranomaismääräyksellä rakennuslupavaiheessa, viranomaismääräyksellä jälkeenpäin tai omaehtoisesti kiinteistön omistajan tai käyttäjän riskiarvion perusteella. Virven sisäpeiton kattavuus tulee sopia yhdessä pelastusviranomaisen kanssa, jota varten on tarvekartoituslomake (L1). [17]

Viranomaisradioverkon osalta, kuten muidenkin sisäkuuluvuusratkaisuiden osalta voidaan todeta, että mitä aikaisemmassa vaiheessa hanketta sisäkuuluvuus huomioidaan, sitä kustannustehokkaampaan ratkaisuun on mahdollista päätyä. Jälkikäteen sisäkuuluvuusongelmien korjaaminen on kallista, eikä vastaavaa sisäpeittoa enää aina ole mahdollista saavuttaa. Tämän vuoksi myös viranomaisradioverkon sisäkuuluvuus tulisi huomioida jo tarvekartoituksessa ja hankesuunnitteluvaiheessa, eikä vasta mahdollisesti rakennuslupan perusteella.

6. Haastattelututkimus

Tässä luvussa on esitelty diplomityötä varten tehty haastattelututkimus ja tutkimuksen tulokset aihepiireittäin mahdollisimman objektiivisesti ja tasapuolisesti.

Haastattelututkimuksen perusteella tehty pohdinta ja johtopäätökset on esitetty luvussa 7.

Haastattelututkimuksen avulla kartoitetaan rakennushankkeen eri osapuolten näkemyksiä liittyen sisäkuuluvuusongelmiin ja sisäkuuluvuuteen osana rakennushanketta. Haastatteluiden avulla pyritään perehtymään sisäkuuluvuusongelmiin sekä etsimään mahdollisia syitä sekä ratkaisuja ongelmiin rakennushankkeen osalta. Haastattelututkimuksen ja sen perusteella tehtyjen johtopäätösten tarkoituksena on osaltaan selkeyttää sähkösuunnittelijan toimenkuvaa parempien sähkösuunnitelmien tuottamiseksi sekä pohtia mahdollisia yhteiskäytäntöjä sähköalalle.

6.1 Tutkimusmenetelmä

Haastattelututkimus valikoitui tutkimusmenetelmäksi, sillä aiheesta haluttiin kerätä myös käytännön tietoa ja kokemuksia aiheen parissa työskenteleviltä henkilöiltä. Haastattelututkimus ei ole tyypillisin tutkimusmenetelmä teknillisellä alalla, mutta työn tavoitteet ja alalla vallitseva tilanne huomioiden sen koettiin tuovan työlle merkittävän lisäarvon, jota ei tässä tapauksessa muilla tutkimusmenetelmillä olisi ollut mahdollista saavuttaa.

Työtä varten toteutettuja haastatteluja voidaan kuvailla teemahaastatteluiksi, sillä haastateltaville esitettiin kysymyksiä ennalta määritellyistä aihealueista haastattelurungon mukaisesti. Aihealueet muokkautuivat jonkin verran haastatteluiden edetessä ja haastateltaville annettiin myös mahdollisuus tuoda esiin omia aiheita haastattelurungon ulkopuolelta. Haastattelut voidaan luokitella myös kvalitatiiviseksi, eli laadulliseksi sekä puolistrukturoiduiksi. Haastatteluilla pyrittiin ymmärtämään paremmin sisäkuuluvuuteen liittyviä asioita, ongelmia ja niiden yhteyksiä, eikä niinkään tarkkaa määrällistä lopputulosta. Haastateltaville annettiin suhteellisen paljon liikkumavaraa keskustella ja kertoa omia näkemyksiään aiheesta haastattelurungon puitteissa, tarvittaessa haastatteluiden aikana esitettiin tarkentavia kysymyksiä. [43]

Haastattelijajoutui kuitenkin huolehtimaan, että kaikkia aiheita ehditään käsittelemään haastattelulle varatussa ajassa, joten riippuen haastateltavasta joitain aiheita käsiteltiin syvällisemmin, kuin toisia. Ajanhallinnan lisäksi haastattelijan täytyi huolehtia, että haastateltavat pysyvät aiheessa, kuitenkin säilyttäen mahdollisimman neutraalin ja hyvän asenteen haastattelututkimuksen näkökulmasta.

Haastattelut nauhoitettiin litteroinnin ja analysoinnin helpottamiseksi. Pian haastatteluiden jälkeen haastattelut kuunneltiin useamman kerran läpi ja litteroitiin, jonka jälkeen haastatteluiden tulokset voitiin järjestää uudelleen aihealueittain. Haastatteluista on nostettu esille työn aiheeseen liittyvät näkökulmat ja haastattelun tulokset on pyritty käsittelemään aihekohtaisesti. Tämän perusteella valikoituivat työssä käsiteltävät aihepiirit. Työn kannalta keskeisimmät aihepiirit ja tulokset on esitetty alaluvussa: 6.3 Aihepiirit ja haastattelutulokset. Kirjoittamisen aikana myös palattiin tarvittaessa nauhoituksiin ja alkuperäiseen litterointiin.

6.2 Haastateltavat

Haastateltaviksi pyrittiin valitsemaan henkilöitä mahdollisimman kattavasti edustamaan rakennushankkeen eri osapuolia liittyen sisäkuuluvuusasioihin. Tämä tavoite saavutettiin tyydyttävästi. Kaikkia alun perin suunniteltuja haastatteluja ei onnistuttu järjestämään, mutta pääsääntöisesti aiheesta oltiin erittäin kiinnostuneita haastateltavien keskuudessa ja haastatteluja järjestyi riittävästi. Haastatteluja järjestettiin yhdeksän ja haastateltavia oli yhteensä kymmenen. Haastatteluissa tulee esiin rakennushankkeessa vaikuttavien eri osapuolten näkökulmat suunnittelusta, urakoinnista, rakennuttajalta, kiinteistön omistajalta, rakennusliikkeiltä, viranomaistaholta sekä operaattoreilta.

Tarkemmat tiedot haastatteluista on esitetty viitteiden yhteydessä työn viimeisillä sivuilla. Haastateltaviin viitataan tulosten käsittelyssä sukunimellä tai viitaten haastateltavan rooliin rakennushankkeessa (esimerkiksi suunnittelija tai urakoitsija).

Haastattelussa diplomityötä varten haastateltiin seuraavia henkilöitä:

- Teemu Seppänen, Osastopäällikkö, Insinööritoimisto Stacon Oy
- Pasi Hyypä, Talotekniikkaryhmän päällikkö, Senaatti-kiinteistöt
- Jukka Pihonen, Radiotarkastusasiantuntija ja Ritva Suurnäkki, Erityisasiantuntija, Liikenne- ja viestintävirasto Traficom
- Jani Kemppainen, Asiamies, Rakennusteollisuus RT ry
- Mika Toivonen, Asiantuntija, Telia Finland Oy
- Mikko Yrjönen, Toimitusjohtaja, Insinööritoimisto Tauno Nissinen Oy
- Harri Hilden, Radiopalveluiden yksikönpäällikkö, Suomen Erillisverkot Oy
- Kimmo Karjalainen, Kehityspäällikkö, Elisa Oy
- Markku Valkealahti, Toimitusjohtaja, Fitelnet Oy.

6.3 Aihepiirit ja haastattelutulokset

Tässä alaluvussa käsiteltyt aihepiirit valikoituivat lopulta työn tavoitteen sekä tietysti haastatteluiden perusteella. Ennen haastatteluiden aloittamista kehitettiin suuntaa antava haastattelurunko yhdessä työn toimeksiantajan kanssa. Haastattelurunko kehittyi ja vakiintui ensimmäisten haastattelujen jälkeen. Haastattelurunko on esitetty liitteessä 1. Haastateltavan aseman perusteella myös haastatteluissa painottuivat eri aihepiirit. Haastatteluissa nousi esiin paljon tietoa ja lukuisia erilaisia aiheita. Lopulta päädyttiin käsittelemään vain työn tavoitteen kannalta oleellisia aiheita. Tällä varmistettiin, että työstä saadaan tiivis ja selkeä kokonaisuus, joka vastaa sille asetettuja tavoitteita.

Useammassa haastattelussa sisäkuuluvuuden lisäksi nousi esille suurten aluerakentamishankkeiden koordinointi- ja sopimusongelmat myös makrotukiasemapaikkojen suhteen. Vaikka kyseessä on tärkeä ja erittäin vaikuttava asia sisäkuuluvuuden kannalta, koettiin aiheen koskevan enemmän esimerkiksi kaupunkisuunnittelua, kun taas tässä työssä keskitytään käsittelemään sisäkuuluvuutta ensisijaisesti yksittäisten rakennushankkeiden ja sähkösuunnittelijan näkökulmasta. Aihe on lisäksi riittävän monitahoinen ja laaja oman diplomityön aikaansaattamiseksi.

Kilpailuttamiseen ja sopimusmenettelyyn liittyvät aihepiirit myös rajattiin työn ulkopuolelle, sillä niihin ei työn puitteissa ollut mahdollista ottaa suoraan kantaa, vaikka työssä käsiteltyä tietoa voi ja kannattaa soveltaa myös tällä osa-alueella sisäkuuluvuuden varmistamiseksi. Lisäksi alkuperäisessä haastattelurungossa omiksi

aiheikseen ajatellut korjaus- ja uudisrakentamien sekä Voice over Wi-Fi päätettiin yhdistää muihin aihepiireihin, sillä niistä ei lopulta muodostunut riittävän merkittäviä haastattelutuloksia oikeuttaakseen erillisen läpikäynnin.

Työssä käsiteltäväksi lopulta valikoituivat seuraavat aihepiirit:

- havaitut sisäkuuluvuusongelmat
- vastuu sisäkuuluvuudesta rakennushankkeessa
- Virve 2.0 ja turvallisuusnäkökulmat
- sisäantenniverkot sähkösuunnitelmissa
- sähkösuunnittelijan rooli ja toimintaedellytykset
- sisäkuuluvuus rakennushankkeessa
- laite- ja tilavaraukset
- 5G-näkökulma ja vaihtoehtoiset ratkaisut.

6.3.1 Havaitut sisäkuuluvuusongelmat

Sisäkuuluvuus ja sen varmistaminen rakennushankkeessa herättää selvästi kysymyksiä ja keskustelua, sillä diplomityön aihe sekä haastattelututkimus koettiin ajankohtaiseksi ja tärkeäksi. Tämä heijastui varmasti myös siihen, kuinka helposti haastattelut lopulta järjestyivät. Aiheeseen siis haluttiin ottaa kantaa ja se koettiin mielenkiintoiseksi.

Haastateltavien näkemykset ongelman vakavuudesta ja laajuudesta kuitenkin poikkesivat toisistaan. Osa haastateltavista koki sisäkuuluvuusongelmat merkittäviksi rakennusosalalla, kun taas joidenkin mielestä kyseessä ei ole niin vakava ongelma kuin julkisuudessa on annettu ymmärtää. Kaikki olivat kuitenkin yksimielisiä siitä, että sisäkuuluvuusongelmat ovat yksi mahdollisista rakennushankkeen riskeistä ja asiaan tulee ehdottomasti kiinnittää huomiota rakennushankkeissa. Useampi haastateltava on kokenut, että sisäkuuluvuusongelmat olisivat vähentyneet viimeisen viiden vuoden aikana. Tarkkaa syytä havainnolle ei osattu sanoa, kyseessä voi olla esimerkiksi uuden lainsäädännön vaikutus, levinnyt tietoisuus aiheesta, uudet tuotteet rakennusosalalla, parantunut ulkopeitto tai edellä mainittujen tekijöiden yhteisvaikutus.

Haastatteluissa nousi esiin, että kuuluvuusongelmia on ilmennyt erityyppisissä rakennuksissa. Erityisesti kuuluvuusongelmia mainittiin esiintyvän isoissa ja laajoissa kiinteistöissä, maanalaisissa tiloissa sekä julkisissa ja liikerakennuksissa. Osassa tätä rakennuskantaa toteutetaan pelastusviranomaisen määräyksestä tai omaehtoisesti Virve-sisäpeitto tai monioperaattoriverkko, jolloin todennäköisesti pystytään välttämään kuuluvuusongelmat näiden kohteiden osalta.

Asuintuotanto sekä uudet kerrostalot nousivat myös esille useammassa haastattelussa sisäkuuluvuusongelmien osalta. Haastateltavien mukaan sisäkuuluvuusongelmat keskittyvät tavallisesti tiettyihin huoneistoihin tai osiin rakennusta, esimerkiksi rakennuksen rungon keskiosa ja alimpien kerrosten liiketilat suurissa rakennuksissa ovat herkimpiä kuuluvuusongelmille. Tiukentuneilla energiatehokkuusvaatimuksilla ja matalaenergiarakentamisella koettiin olevan selvä yhteys sisäkuuluvuusongelmiin.

Keskusteltaessa sisäkuuluvuusongelmista nousi esille määritelmä riittävästä sisäkuuluvuudesta. Näkökanta, jonka mukaan kuuluvuus yhdessä pisteessä rakennusta tai huoneistoa olisi riittävä, nähtiin osittain puutteelliseksi. Tätä voi verrata vanhaan lankapuhelinaikaan, jolloin puhelinpisteitä oli yleensä yhdessä tai kahdessa kohtaa huoneistoa, joka riittää enää harvalle kuluttajalle. Esille tuotiin myös yleinen

turvallisuus ja hätäpuheluiden mahdollistaminen kaikkialta rakennuksesta tärkeänä keskustelunaiheena. Yleispätevän määritelmän muodostaminen riittävän sisäkuuluvuuden osalta on kuitenkin haasteellista. Yritysassiakkaille riittävä sisäkuuluvuus voidaan määritellä tapauskohtaisesti perustuen yrityksen tarpeisiin, sillä palvelulla pyritään varmistamaan yrityksen toimintaedellytykset.

6.3.2 Vastuu sisäkuuluvuudesta rakennushankkeessa

Kaikkien haastateltavien kesken tunnistettiin, että maankäyttö- ja rakennuslain § 117 j mukaan vastuu sisäkuuluvuudesta on rakennushankkeeseen ryhtyvällä.

Pelastusviranomaisen voi myös osoittaa kiinteistön omistajalle vastuun Virve-sisäkuuluvuudesta. Tästä huolimatta haastateltavien keskuudessa vastuukysymys koettiin hankalaksi aiheeksi.

Hankalaksi vastuukysymyksessä koettiin etenkin rakennushankkeeseen ryhtyvän tai kiinteistön omistajan mahdollisesti riittämätön tietotaso liittyen radioverkkoihin. Pitkät omistusketjut esimerkiksi sijoitusyhtiöiden kohdalla nousivat myös esiin ongelmallisina. Tällöin käytännön tason vastuu tai tehtävänjako sisäkuuluvuudesta pääsee helposti hämärtymään. Näissä tilanteissa rakennusyhtiön, sähkösuunnittelijan tai muun suunnitteluryhmän ammattitaito korostuu, sillä heidän tehtäväkseen jää huolehtia, että asia otetaan esille ja ryhdytään tarvittaviin toimenpiteisiin sisäkuuluvuuden varmistamiseksi. Ihanteellisessa tilanteessa kaikki suunnittelijat osaisivat huomioida toimenpiteiden vaikutuksen sisäkuuluvuuteen. Esimerkiksi arkkitehdin ja rakennesuunnittelijan vastuu korostuu etenkin silloin, kun hankkeessa ei ole mukana sähkösuunnittelijaa. Traficomin osalta korostettiin myös rakennusvalvonnan vastuuta sisäkuuluvuuden varmistamisessa, sillä vastuu maankäyttö- ja rakennuslain täytäntöönpanosta on kunnallisilla rakennusvalvontaviranomaisilla. Rakennusvalvonnan siis tulisi varmistua, että sisäkuuluvuus on huomioitu rakennushankkeessa.

Operaattorien osalta Telia Finlandilta Toivonen otti esille myös operaattorin osuuden sisäkuuluvuusasioissa. Operaattoreille asetettujen peittovelvoitteiden myötä operaattorilla on vastuu yleispeitosta. Ensimmäisessä operaattori pyrkii toteuttamaan sisäpeiton riittävällä ulkopeitolla, sillä ilman riittävää ulkopeittoa ei rakennuksen omistajalla ole mahdollisuutta varmistua sisäkuuluvuudesta ilman erillisiä sisätilaratkaisuja. Tätä tuovat esiin myös rakennusliikkeet. Käytännössä sisäkuuluvuudesta on siis jaettu vastuu operaattorin ja rakennushankkeeseen ryhtyvän tai kiinteistön omistajan kesken. Operaattori ei kuitenkaan pysty varmistamaan yksittäisten rakennusten sisäkuuluvuutta ulkopeiton avulla, sillä rakennuksen radiosignaalin vaimennusominaisuudet voivat yksinkertaisesti olla ylitsepääsemättömiä.

Operaattorien toiveiden mukaisesti ulkopeiton avulla toteutettava sisäkuuluvuus vaatii rakennuksen vaimennusominaisuuksien huomioimista esimerkiksi rakennesuunnittelussa. Rakennusteollisuuden mukaan tämä ei ole kuitenkaan ongelmatonta rakentajille, sillä ulkovaippaan ja rakennuksen runkoon tehtävät toimenpiteet eivät välttämättä ole rakennuttajille läheskään yhtä kustannustehokkaita vaihtoehtoja, verrattuna esimerkiksi sisäantenniverkkoon. Etenkin uusista passiivisin menetelmin sisäkuuluvuutta parantavista rakennustuotteista ollaan alalla kiinnostuneita. Maankäyttö- ja rakennuslaissa voidaan sisäkuuluvuuden mahdollistamisen yhteydessä ottaa kustannustehokkuus huomioon. Lisäksi kevyiden rakenneosien käyttö julkisivussa voi johtaa muihin haasteisiin, kuten esimerkiksi riittävään meluntorjunnan saavuttamiseen. Periaatteessa ainoa vaihtoehto, jolla rakennushankkeeseen ryhtyvä voi täysin varmistua sisäkuuluvuudesta on erillinen sisätilaratkaisu.

6.3.3 Virve 2.0 ja turvallisuusnäkökulmat

Virve 2.0:n myötä viranomaisradioverkko siirtyy toimimaan kilpailutuksen voittaneen operaattorin 4G-verkon päälle. Tämä tarkoittaa Virven toimimista 4G-taajuuksilla, joista tällä hetkellä 700 MHz ja 800 MHz ovat alimmat taajuusalueet, eli karkeasti noin kaksinkertaiset verrattuna Virven nykyiseen 400 MHz:n taajuusalueeseen. Ennen siirtymää viranomaisradioverkon matalampi taajuusalue on taannut sille paremman läpäisyn rakennuksiin. Erillisverkkojen Hildenin lisäksi monet muut haastateltavat ovat huolissaan Virven sisäkuuluvuudesta siirryttäessä 4G-taajuuksille, sillä esimerkiksi juuri pelastusviranomaiset tulevat entistä riippuvaisemmaksi yleisestä sisäkuuluvuudesta. Huoneistojen lisäksi kuuluvuutta tarvitaan viranomaisnäkökulmasta myös esimerkiksi käytävillä, portaikoissa ja kellarissa.

Virve 2.0:n käyttöönnotolla ja korkeammilla taajuuksilla on vaikutusta nykyisten sisäantenniverkkojen toimintaan. Vanhoissa verkoissa siirtyminen LTE-teknologiaan tarkoittaa todennäköisesti ainakin komponenttien uusimista. Korkeampi taajuusalue vaikuttaa myös väliseinien RF-läpäisyyseen, jolloin mahdollisesti joudutaan arvioimaan sisäantennien määrää ja sijoitusta uudelleen. Tämän lisäksi koaksiaalikaapeliverkon kasvaneet vaimennukset vaikuttavat verkon suorituskykyyn. Hildenin mukaan kannattaa arvioida onko kokonaiskustannuksiltaan edullisempaa rakentaa kokonaan uusi sisäantenniverkko kuin saneerata vanha verkko. Nykyisten sisäantenniverkkojen saneeraukset jäävät todennäköisesti Virven osalta Erillisverkkojen hoidettavaksi. Huomioitavaa on, että korkeampien taajuuksien lisäksi LTE-teknikka voi olla herkempi häiriöille. Tämän takia Virve vaatii entistä tarkempaa suunnittelua tulevaisuudessa. Huomiota tulee kiinnittää erityisesti kytketyis- ja kaapelivaimennuksiin, riittävään isolointiin ja laadukkaisiin komponenttivalintoihin.

Monissa haastatteluissa keskusteltiin viranomaisradioverkon kuuluvuuden lisäksi yleisestä sisäkuuluvuudesta ja sen tärkeydestä yleisen turvallisuuden näkökulmasta. Mahdollisuus hälyttämiseen, esimerkiksi juuri hätäpuhelun soittaminen kaikkialla rakennuksessa, koettiin tärkeäksi ja nykyisellään myös laiminlyödyksi aiheeksi. Sisäkuuluvuuden varmistamiseksi, etenkin Virve 2.0:n käyttöönoton myötä, tarvittaisiin haastateltavien mielestä entistä selkeämpiä toimintaohjeita ja yhteisiä käytäntöjä sisäkuuluvuuden toteuttamiseen. Suunnittelijat sekä urakoitsijat toivovat selkeätä ohjeistusta sisäpeiton suhteen. Esimerkiksi sisäpeitto Virven käyttämillä taajuusalueilla voitaisiin pyrkiä varmistamaan ennalta määritellyissä osissa rakennuksia, jolloin myös tilaajan toiminta helpottuisi näiltä osin. Lisäksi Erillisverkkojen näkökulmasta tärkeitä keskusteluja on käytävä tulevaisuudessa Virve 2.0:n osalta sisäantenniverkkojen hallinnasta, suunnittelusta ja urakoinnista.

6.3.4 Sisäantenniverkot sähkösuunnitelmissa

Haastatteluista käy ilmi, että sähkösuunnittelijoiden osaamistaso on hyvin vaihtelevaa liittyen sisäantenniverkkojen suunnitteluun. Sisäkuuluvuushankkeissa toimineille henkilöille on tullut vastaan hyvin eri tasoisia suunnitelmia, joista huonoimmat ovat olleet jopa toteutuskelvottomia. *”Tää on ollu Suomessa hyvin paljon viivan piirto. Siellä ei oo mitään mitoituksia tai laitespesifikaatioita”*, sanoo Insinööritoimisto Tauno Nissisen toimitusjohtaja Yrjönen. Huomattavan samalla linjalla on Suomen Erillisverkkojen Hilden, joka toteaa: *”Näkee, että sinne kaapelihyllylle on piirretty mustaa viivaa, mutta siinä ei oo mukana mitään komponentteja tai laskettu linkkibudjetit”*. Yrjönen ja Hilden viittaavat pelkällä viivan piirrolla siihen, että suunnitelmista on puuttunut tarvittavalla tasolla laskelmat ja laitevalinnat.

Sisäkuuluvuus tulee huomioida aina hankekohtaisesti. Useat haastateltavista painottivat, että hyvät suunnitelmat alkavat asianmukaisesta tarvekartoituksesta ja riittävän laajuudesta hankesuunnitelmasta. Aluksi tulee arvioida sisäantenniverkon tarpeellisuus kohteen sijainnin, rakennustyyppin ja käyttäjän toiminnan perusteella. Peruskorjauskohteessa voidaan hyödyntää tehokkaasti mittauksia apuna, kun taas uudiskohteessa määrittäminen perustuu yleensä arvioon ja kokemukseen. Investointipäätöksen tueksi voidaan tehdä rakentamisen loppuvaiheessa tarvittavat mittaukset. Viranomaisradioverkon tarvekartoitus tehdään L1-lomakkeelle. Lisäksi olisi hyvä varmistaa tilaajan, rakennusvalvonnan ja pelastusviranomaisen kesken kohteen erityistarpeet viranomaisradioverkon osalta. Tässä vaiheessa tulisi muutenkin määrittää sisäkuuluvuusratkaisulle asetettavat vaatimukset käytettävien taajuusalueiden, laajuuden, varmennusajan, redundantisuuden ja tavoiteltavan laadun osalta.

Hyviin suunnitelmiin kuuluu aina vuoropuhelu operaattorien kanssa. Kaupallisiin operaattoreihin ja Erillisverkkoihin kannattaa olla riittävän ajoissa yhteydessä, jotta saadaan varmistettua ajoissa liittyminen ja liittymistapa. Liittymistavalla on vaikutusta käyttäjän passiivisen sisäverkon komponenttien valintoihin, operaattorin omiin laitevalintoihin tukiaseman tai toistimen suhteen sekä näiden laitteiden sijoitteluun rakennuksessa. Huomioitavaa on, että vain operaattori taajuusluvan haltijana voi omistaa tarvittavat laitteet verkkoon liittymiseksi. Hankesuunnitelman perusteella tulisi sisäkuuluvuuden toteutustapa olla jo selvillä.

Haastateltavat painottivat linkkibudjetti- ja säteilyturvallisuuslaskelmien tärkeyttä osana hyvää suunnittelua. Laskemalla vaimennukset sekä minimi- ja maksimitehot jokaiselle antennille voidaan varmistua tasaisesta tehonjaosta verkossa ja suositusten mukaisista altistustasoista sisätiloissa. Helpoiten tasainen peitto saavutetaan pyrkimällä mahdollisimman tähtimäiseen verkkoon, eli jakamalla tehoa mahdollisimman tasaisesti verkon alkupisteestä lähtien. Tämä tarkoittaa, että operaattoritilasta tulisi lähteä mieluiten useammalla antennikaapelilla. Alimitoituksen välttämisen lisäksi verkkoa ei tule ylimitoitaa, joka tekee suunnittelusta haastavaa. Haastateltavien mukaan huomiota tulisi kiinnittää ehdottomasti myös laitevalintoihin ja -määrittelyyn. Suunnitelmat olisi hyvä käydä tilaajan sekä operaattorien kanssa läpi, jotta voidaan varmistua verkon riittävästä laajuudesta sekä oikeista laitevalinnoista ja liittymistä.

Ensiluokkainen suunnittelu vaatii kuitenkin aina mittaukset suunnittelun tueksi, vaikka suunnittelussa voidaan edetä hyvin pitkälle kokemuseräisesti. Monesti puutteet selviävät parhaiten suorittamalla mittaukset kohteessa, jolloin tiedetään miten verkkoa kannattaa täydentää ja samalla varmistetaan verkon toimivuudesta. Esimerkiksi yksikin huono liitos voi aiheuttaa verkkoon PIM-häiriöitä, jotka osuessaan operaattorien taajuusalueille voivat aiheuttaa vakavia häiriöitä palveluun. Tietotekniikka on myös mahdollistanut sisäantenniverkkojen suunnittelun käyttäen apuna mallinnusohjelmia. Haasteena mallinnuksessa on kuitenkin materiaalitietojen saaminen oikeassa muodossa.

Haastatteluissa nousi esille myös puutteita nykyisessä ohjeistuksessa liittyen sisäverkkojen suunnitteluun ja toteutukseen. Huomion arvoista on, että nykyistä ST-korttia kirjoitetaan parhaillaan osittain uusiksi. Ohjeistusta uudessa ST-kortissa toivotaan tiukemmaksi komponenttien laadun ja suorituskyvyn osalta. Lisäksi toivotaan, että uudessa ohjeistuksessa otetaan kantaa verkkojen rakentamiseen myös 5G:n osalta.

6.3.5 Sähkösuunnittelijan rooli ja toimintaedellytykset

Sähkösuunnittelutoimistojen vaihtelevasta osaamistasosta huolimatta kuitenkin nähdään sisäantenniverkkojen ja muiden sisäkuuluvuusratkaisujen suunnittelu järkeväksi vaihtoehdoksi sisällyttää osaksi sähkösuunnittelua rakennushankkeen kokonaisuuden kannalta, sillä tavanomaisissa hankkeissa muuta järkevää vaihtoehtoa ei ole. Haastateltavista etenkin Hyyppä Senaatti-kiinteistöiltä oli sitä mieltä, että tilaajan kannalta hankkeen koordinointi helpottuu, jos sisäverkkoratkaisu sisältyy sähkösuunnitelmiin ja -urakkaan. Yleensä rakennushankkeessa sähkösuunnittelijalla on vastuu huolehtia kaikkien sähköisten järjestelmien kokonaisuudesta ja kaapeloinnista, joka tarkoittaa, että sähkösuunnittelija vähintään dokumentoi tai valvoo eri järjestelmien dokumentointia. Sähkösuunnittelija on myös yleensä yhteydessä tarvittavista kaapelireiteistä ja tilavarauksista arkkitehtiin jo hanke- ja yleissuunnitteluvaiheissa, jolloin on luonnollista, että sähkösuunnittelija myös huomioisi sisäantenniverkon tilavaraukset jo tässä vaiheessa. Tämän myötä sähkösuunnittelija myös tuntee rakennuksen ja sen kaapelireitit varsin hyvin, yleensä paremmin kuin mahdollisesti myöhemmin mukaan tulevat erikoissuunnittelijat.

Haastattelujen perusteella on kuitenkin selvää, että yleisellä tasolla sähkösuunnittelijoiden osaaminen radioverkkojen suunnittelusta on vähintäänkin heikkoa ja sitä tulisi kehittää. Heikon osaamisen nähdään juontavan juurensa koulutusohjelmista, joista sähkösuunnittelijoita tavallisesti työllistyy. Koulutuksessa ei siis käsitellä riittävästi tai ollenkaan radiotekniikkaa ja sisäverkkoratkaisuja. Esimerkiksi sisäantenniverkko toteutetaan suhteellisen pieneen osaan rakennuskannasta, joka osaltaan johtaa tiedon keskittymiseen harvoille henkilöille ja toimistoille. Kaikille suunnittelijoille ei yksinkertaisesti tule niin paljon kohteita, jotta riittävän tasoinen perehtyminen olisi perusteltavissa. Tästä huolimatta, esimerkiksi Yrjönen Insinööri-toimisto Tauno Nissiseltä ei näe sisäverkkojen suunnittelua puhtaasti erikoissuunnittelualana, vaan painottaa, että sähkösuunnittelutoimistoista tulisi jatkossa löytyä riittävä osaamista tähänkin tehtävään, sillä kyseessä ei kuitenkaan ole ylitsepääsemättömän vaikea aihe, vaikka vaatiikin perehtymistä. Lisäksi useampi haastateltava toi esiin näkemyksen, jonka mukaan radioverkkojen suunnittelu tulisi tarvittaessa teettää alikonsultointina, jos riittävä osaamista ei löydy omasta toimistosta.

Sähkösuunnittelun tilaavan tahon osaaminen koettiin monesti myös puutteelliseksi, mikä vaikeuttaa osaltaan sähkösuunnittelijan toimintaedellytyksiä, sillä lähtökohdat onnistuneelle suunnittelulle ovat huonot. Erillisverkkojen Hilden nostaa esille, että monesti etenkin laajuuden ja laadun määrittely puuttuu tilaajan toimesta. Tämä johtaa tilanteeseen, jossa tilaajan odotukset ja suunnitelmat eivät kohtaa. Yrjönen puolestaan kertoo, että sähkösuunnittelija kokee monesti olevansa yksin sisäkuuluvuuden osalta hankkeessa, eikä saa tarvittavaa tukea tilaajan tai rakennuttajan taholta. Tilaajan puutteellinen tieto voi myös vaikeuttaa yhteistyötä muun suunnitteluryhmän kesken, sillä viime kädessä tilaajalta tulee ohjeistus suunnitelmien yhteensovittamisesta. Kokonaisuudeltaan paras lopputulos ja hyvä sisäkuuluvuus saavutetaan suunnittelijoiden yhteispelillä. Etenkin Traficomilla tehdyn haastattelun pohjalta esiin nousee, että tilaajan tietotason ollessa heikko, suunnittelijoiden ja rakennusyhtiön ammattitaito ja vastuu korostuvat hankkeessa.

Tärkeäksi osaksi sähkösuunnittelijan toimintaan sisältyy tilaajan, mutta myös loppukäyttäjän tarpeiden huomiointi, kertoo Hyyppä Senaatti-kiinteistöistä. Sähkösuunnittelijan tulisi siis pystyä arvioimaan käyttäjän toimintaa ja tarvittaessa vähintään tuoda sisäkuuluvuusasiat esille rakennushankkeessa. Vaikka pidemmällä aikavälillä tarkasteltuna sähkösuunnittelijoiden etu olisi nostaa sisäkuuluvuusasiat aina

esille, näin ei kuitenkaan tehdä, vaan lisätöiden esittämistä on kartettu jossain määrin ainakin sähkösuunnittelijoiden osalta. Syitä voi olla monia, esimerkiksi alue voidaan kokea erikoissuunnitteluksi, jos osaaminen ei ole riittävällä tasolla tai lisäsuunnittelua ei haluta ottaa tiukan aikataulun vuoksi.

6.3.6 Sisäkuuluvuus rakennushankkeessa

”Sisäkuuluvuuden varmistaminen, se on aika pitkän aikavälin tekemistä ja se lähtee oikeastaan ennen kuin yhtäkään perustusta on laitettu”, kertoo Karjalainen Elisalta. Hänen, kuten monen muunkin mukaan, sisäkuuluvuuden varmistamiseksi toiminta tulisi aloittaa suunnitteluvaiheessa, hyvissä ajoin ennen itse rakentamisen aloittamista. Vuoropuhelu ja yhteistyö operaattorien kanssa kuuluu oleellisena osana hyvään suunnitteluprosessiin. Yleisesti voidaan todeta, että mitä aikaisemmin sisäkuuluvuus huomioidaan hankkeessa, sitä kustannustehokkaammin ratkaisuun päästään.

Eritoten operaattorit kokevat, että rakennuksen suunnitteluvaiheessa yhteistyötä operaattorien kanssa tulisi tiivistää. Tämä ei koske vain sisäkuuluvuutta, sillä operaattorien toive olisi, että yhteistyö myös makrotason tukiasemapaikkojen järjestämiseksi olisi tiiviimpää rakennuttajien kanssa. Esimerkiksi rakennuksen luovutuksen jälkeen tukiasemapaikan järjestämisen koetaan vaikeutuvan huomattavasti. Tällä voidaan nähdä olevan vaikutusta myös sisäkuuluvuuteen, sillä rakennuksen sisäpeitto pyritään ensisijaisesti toteuttamaan hyvällä ulkopeitolla. Operaattorien lisäksi on kiinteistön omistajan sekä käyttäjän etu, että tarvittavat tila- ja laitevaraukset saadaan järjestettyä asianmukaisesti.

Sisäkuuluvuuteen on nyt kiinnitetty myös lainsäädännön tasolla huomioita. Maankäyttö- ja rakennuslain perusteella sisäkuuluvuuden huomiointi tulisi näkyä entistä selkeämmin rakennushankkeissa. Lisäys lakiin on kuitenkin suhteellisen tuore, joten sen vaikutusta sisäkuuluvuuteen on vielä vaikeaa arvioida. Maankäyttö- ja rakennuslain täytäntöönpanon osalta monet haastateltavista korostivat rakennusvalvonnan roolia ja toivovat myös viranomaistaholta aktiivista otetta sisäkuuluvuusasioissa. Puolestaan viranomaisradioverkon sisäkuuluvuuden rakentaminen on ollut tähän mennessä harvoin vapaaehtoista, eli yleensä viranomainen on vaatinut sitä hankkeen lupavaiheessa.

Ainakin rakennuttajan näkökulmasta sisäverkkoratkaisun suunnittelu ja urakointi tulisi sisällyttää käytännössä aina sähkösuunnitelmiin ja -urakkaan. Tällöin rakennushankkeen ja työmaan hallinta helpottuu, kun toimijoita on vähemmän. Tarvittaessa erikoissuunnittelua ja -urakointia vaativat työt voidaan suorittaa alihankintana, jolloin kyseinen taho vastaa alihankinnasta ja työn koordinoinnista. Sisäverkkoratkaisujen sisällytys sähkösuunnitteluun ja -urakkaan ei ole ongelmatonta.

Karkea arvio rakennuksen vaimennuksesta ja sisäkuuluvuudesta voidaan tehdä esimerkiksi rakennustoimenpiteen perusteella, kuitenkin mittaukset kuuluvat oleellisesti sisäkuuluvuuden toteuttamiseen. Mittauksilla selvitetään kuuluvuutta rakennuspaikalla, ennen saneerausta, investointipäätöksen tueksi hankkeen aikana tai jo valmistuneessa rakennuksessa. Antenniverkon mittauksia suoritetaan myös erikseen, jotta varmistutaan verkon toiminnasta. Haastatteluissa nousi esille, että hankkeessa suoritettavat mittaukset tulisi määritellä esimerkiksi suunnittelijan toimesta. Mittausten määrittelyssä tulisi ottaa kantaa mittausten laajuuteen, taajuusalueisiin, mittauksille asetettuihin raja-arvoihin sekä ajankohtaan. Fitelnetin toimitusjohtaja Valkealahti muistuttaa, että tarvittaessa rakennushankkeessa tulee harkita puolueettoman tahon käyttämistä mittauksissa.

Investointipäätöksen tukena mittaukset koettiin kaikkien haastateltavien kesken suoraviivaiseksi tavaksi varmistua sisäverkkoratkaisun tarpeellisuudesta rakennushankkeessa, koska sisäkuuluvuuden taso voidaan todeta mittaamalla. Haastateltavat totesivat kuitenkin, että käytännössä investointipäätöksen tueksi tarvittavat mittaukset ovat hankalia ajoittaa rakennushankkeen kokonaisaikataulun kannalta. Luotettavien mittausten suorittamiseksi rakennuksen ulkovaipan tulisi olla vaimennusominaisuuksiltaan mahdollisimman lähellä valmista rakennetta. Esimerkiksi viimeiset ovet ja ikkunat tulevat myöhäisessä vaiheessa työmaalle, samoin rakennuksen ulkokuoren pintamateriaali ei välttämättä vastaa lopullista. Usein tarvittavat mittaukset päästään suorittamaan liian myöhäisessä vaiheessa, jolloin esimerkiksi sisäantenniverkon osalta työt päästään aloittamaan liian myöhään suhteessa hankkeen aikatauluun ja muihin rakennustöihin. Etenkin runkokaapelien oikea aikainen asentaminen on oleellista, mutta varautuminen sisäantenniverkkoon asentamalla runkokaapelit valmiiksi on kuitenkin taloudellisesti kyseenalaista.

6.3.7 Laite- ja tilavaraukset

Kautta linjan haastateltavat pitivät lähtökohtaisesti sisäverkkoratkaisuihin, erityisesti sisäantenniverkkoon, varautumista positiivisena ja suositeltavana, koska aina sisäkuuluvuutta ei voida toteuttaa ulkopeiton avulla. Suurin osa haastateltavista oli yhtä mieltä siitä, että uudisrakennuksessa tulisi aina varautua erilliseen sisäverkkoratkaisuun, kun taas korjausrakentamisessa varaukset kannattaa tehdä vain tarpeen vaatiessa. Keskusteltaessa tarkemmin varautumisen kattavuudesta haastateltavien mielipiteet vaihtelivat jonkin verran. Yleinen mielipide on, että järjestelmän tarvitsemille laitteille tulee tehdä riittävät tilavaraukset, samoin kuten esimerkiksi sisäantenniverkkoon olisi kannattavaa varautua myös kaapelireittien ja putkitusten osalta.

Varausten ja putkitusten hintavaikutus jää hyvin maltilliseksi, kunhan ne huomioidaan riittävän ajoissa, kun taas ilman varauksia sisäantenniverkon rakentaminen jälkikäteen tulee lähes poikkeuksetta kalliiksi. Velvoittaminen varautumiseen on kuitenkin hyvin haastavaa, sillä jo muutaman neliön tilavaraus voi vaikuttaa merkittävästi katteeseen riippuen hankkeesta, joten tällä hetkellä voidaan antaa vain suosituksia ja ohjeita varautumisesta. Suoraviivaisia kaapelireittejä sekä suoria nousukuiluja kaikkien kerrosten välillä rakennuksessa pidettiin myös ensisijaisen tärkeänä.

Sisäantenniverkon osalta operaattoreille kannattaa varata yhteinen operaattoritila, johon kaikki operaattorit voivat sijoittaa verkkoon liittymiseksi tarvitsemansa tukiasemat tai toistimet. Operaattoritilan sijainnista ja tarvittavasta tilavarauksesta haastateltavat ovat pääpiirteittäin yhtenevällä linjalla. Operaattoritilalle tyypilliset sijoituspaikat ovat olleet joko vesikaton läheisyydessä, kuten IV-konehuoneen yhteydessä, tai rakennuksen maantaso- tai kellarikerroksessa muiden sähkö- ja telelaitetilojen tapaan.

Optimaalinen sijainti tilalle määräytyy rakennuskohtaisesti, sillä sijoitukseen vaikuttaa rakennuksen geometria, liittymistapa, kaapelireitit ja huollettavuus. Toistintarkoituksissa luontevaa on sijoittaa operaattoritila rakennuksen yläosaan, lähelle antennia, kun taas tukiasemarakentamisissa laitetila voi sijaita kellarissa. Isoissa ja kriittisissä kohteissa on Valkealahden mukaan parasta sijoittaa laitetila yleensä kellarikerrokseen. Kellarista on yleensä suoraviivaisimmat kaapelireitit kaikkiin rakennuksen eri osiin ja kulunvalvonta on monesti vaivattomampi järjestää kellariin. Operaattorit tarvitsevat ympärivuorokautisen pääsyn laitetilaan ja antennille, joka voidaan järjestää esimerkiksi sarjoitetulla avaimella, avain säilöllä tai henkilökunnan kautta. Keskimäärin operaattoritilaan tulisi varata tilaa yhden laiteräkin (60×60 cm) verran kullekin

operaattorille tukiasemalaitteita varten. Tämän lisäksi sähkönsyötön varmennukseen tarvitaan useamman räkin verran tilaa akustoille, joka tulee huomioida myös laitteiston painon osalta.

Nyrkkisääntönä tukiaseman sähkönkulutus vastaa keskimäärin omakotitaloa, joten tilaan tarvitaan mitattu sähkönsyöttö operaattoreita varten. Tavallisesti yksi operaattoreista järjestää varmennetun sähkönsyötön tilassa ja laskuttaa sen muilta operaattoreilta, mutta vaihtoehtoisesti tapauksen mukaan kiinteistön on myös mahdollista järjestää varmennettu sähkösyöttö huomioiden operaattoreille asetetut määräykset sähkönsyötön varmentamisesta. Toivosen mukaan kokonaan kiinteistön puolesta järjestetty sähkönsyöttö suoraviivaistaisi toteutusta.

Operaattorien näkökulmasta mahdollinen makrotukiaseman sijoittaminen kiinteistöön tulisi myös huomioida tilavarausten sekä putkitusten osalta jo hankkeen suunnitteluvaiheessa. Mastoradioiden lisääntynyt käyttö on myös tuonut joustavuutta kaapelointiin, kun suurin osa antennin ja aktiivilaitteiden välisestä kaapeloinnista toteutetaan kuitukaapeleilla antennin lähellä sijaitsevalle radiolaitteelle koaksiaalikaapelin sijaan. Mastoradioille tulee kuitenkin varata riittävästi kuitupareja. Lisäksi operaattorien näkökulmasta varaputkitukset rakennusten välillä helpottavat verkon tiivistämistä ja todennäköisesti myös vähentävät tulevia kaivuutöitä kiinteistön alueella.

6.3.8 5G-näkökulma ja vaihtoehtoiset ratkaisut

5G on tuore ja ajankohtainen aihe, myös sisäkuuluvuuden osalta. Haastateltavien 5G-näkökulmat ovat parhaillaan muotoutumassa ja kehitystä seurataan aktiivisesti. Kaikki haastateltavat näkivät, että 5G:n korkeampien taajuusalueiden käyttöönoton myötä myös sisäkuuluvuusongelmat tulevat näiltä osin lisääntymään. Haastateltavien keskuudessa koetaan, että nykyinen 5G-taajuusalue (3,5 GHz), millimetriaalloista puhumattakaan, omaa oleellisesti heikommat läpäisyominaisuudet, kuin alemmat taajuusalueet. Tämä vaikuttaa RF-signaalin läpäisyyn niin rakennuksen ulkovaipassa, mutta myös rakennuksen sisällä. Useampi haastateltavista lisäksi muistutti, että jatkossa taajuusalueet eivät ole teknologiasidonnaisia, joka tarkoittaa, että 5G:tä voidaan käyttää tarvittaessa myös alemmilla taajuusalueilla vanhojen teknologioiden väistyttyä. Vaikka kuuluvuusongelmat huolettavat haastateltavia, kuitenkin 5G:hen suhtaudutaan positiivisesti.

Telian näkemyksen mukaan 5G:lle joudutaan toteuttamaan entistä enemmän sisätilaratkaisuja. Samankaltaisia johtopäätöksiä voidaan tehdä muidenkin haastattelujen perusteella. Haastateltavista ainakin Seppänen, Toivonen ja Yrjönen jakoivat ajatuksen, jonka mukaan 5G-sisäantenniverkkoa voi olla haastavaa toteuttaa perinteisellä koaksiaalikaapeloinnilla. Nykyisten sisäantenniverkkojen lisäksi vaimennukset sekä antennien sijoittelu voivat muodostua ongelmiksi myös uusien verkkojen toteutuksessa. Tämän lisäksi perinteisessä sisäantenniverkossa ei voida hyödyntää useita 5G-teknologian ominaisuuksia, kuten moniantennihyötyjä, jolloin vaihtoehtoiset ratkaisut nousevat esiin entistä varteenotettavimpina vaihtoehtoina. Hyypä arvelee, että todennäköisesti noin kahden vuoden sisällä ratkaisut ovat myös 5G:n osalta tiedossa.

Tällä hetkellä todennäköisimpinä vaihtoehtoisina ratkaisuina sisäantenniverkolle nähdään Femtocell-tyyppiset tukiasemat sekä Voice over Wi-Fi -verkko. Kummastakaan ratkaisusta haastateltavilla ei ollut laajamittaista kokemusta ja molemmat ratkaisut sisältävät toistaiseksi avoimia kysymyksiä.

Voice over Wi-Fi -verkko nähdään kuitenkin todennäköisemmin yleistyvänä vaihtoehtona, sillä siitä on enemmän kokemusta ja hallinnollisesti Voice over Wi-Fi -verkko on helpompi toteuttaa, eikä laajoissakaan verkoissa pitäisi olla teknistä rajoitetta. Operaattorit yleensä ehdottavat Voice over Wi-Fiä kuuluvuusongelmiin ensimmäisten ratkaisuiden joukossa, sillä se on yleensä hyvin kustannustehokas vaihtoehto, eikä se ole esimerkiksi puheluiden osalta operaattorisidonnainen.

Suurimpina haasteina Voice over Wi-Fi -ratkaisuihin nähdään yhteensopivien laitteiden asettamat rajoitteet sekä tekniikan sujuvan käytön omaksuminen laajan käyttäjäkunnan keskuudessa. Wi-Fi-verkossa huono peitto on koettu vaikuttavan oleellisesti myös puheliikenteen laatuun, jonka takia verkon suunnitteluun tulee kiinnittää erityistä huomiota, jos sitä tullaan hyödyntämään erityisesti puheliikenteen saralla. Suomen Erillisverkkojen näkökulmasta Voice over Wi-Fiä ei nähdä lähitulevaisuudessa viranomaisverkon sisäkuuluvuusratkaisuna. Muistakin haastateltavista oli havaittavissa kielteinen suhtautuminen Voice over Wi-Fi verkkoon yleispätevänä ratkaisuna kaikkiin sisäkuuluvuusongelmiin, vaan se nähtiin ennemminkin kohdekohtaisena ja täydentävänä ratkaisuna sisäkuuluvuusongelmaan.

Femtocell-ratkaisuihin tuotiin esille sen huonona puolina operaattorisidonnaisuus sekä mahdolliset häiriöt viereisiin tukiasemiin. Operaattorit eivät ole Suomessa lähteneet toistaiseksi suosimaan Femtocell-ratkaisuja, vaikka valmistajat ovat olleet tuomassa niitä aktiivisesti markkinoille. Haastattelujen perusteella voidaan kuitenkin todeta, että teknologian kehittyessä IP-rajapinta tulee siirtymään entistä lähemmäs loppukäyttäjää ja tätä myötä myös sisäradioverkon kaapelointi tulee muistuttamaan entistä enemmän yleiskaapelointiverkkoa.

7. Pohdinta ja johtopäätökset

Tässä luvussa on esitetty diplomityössä kirjallisuuskatsauksen ja haastattelututkimuksen perusteella tehty pohdinta ja johtopäätökset. Johtopäätöksissä pyritään hyödyntämään tietoa kokonaisvaltaisesti kirjallisuuskatsauksesta, haastatteluista sekä kirjoittajan tähänastisia kokemuksia sähkösuunnittelun parissa.

7.1 Näkökulmat sisäkuuluvuusongelmiin

Haastattelututkimus osaltaan vahvisti työn teoreettisessa osassa kirjallisuuskatsauksen perusteella syntynyttä näkemystä, jonka mukaan sisäkuuluvuusongelmat ovat mahdollisia sekä uudis- että korjausrakentamishankkeissa. Pahimmillaan sisäkuuluvuusongelmat ja puutteellinen sisäpeitto voivat johtaa loppukäyttäjän tyytymättömyyteen, yritykselle soveltumattomaan toimintaympäristöön tai jopa erinäisiin vaaratilanteisiin. Sisäkuuluvuusongelmiin tulisi siis suhtautua aina riittävällä vakavuudella ja arvioida rakennushankkeessa sisäkuuluvuusongelmien todennäköisyys ja niistä aiheutuvat riskit, joiden perusteella voidaan ryhtyä tarvittaessa toimenpiteisiin.

Haastateltavien mukaan sisäkuuluvuusongelmia esiintyy etenkin rakennusmassaltaan isoissa ja laajoissa rakennuksissa, tunneleissa sekä maanalaisissa tiloissa. Mobiiliverkon kapasiteetin tarve tulee myös huomioida ihmismäärältään suurissa rakennuksissa. Yleensä suurissa julkisissa kohteissa sisäkuuluvuus on otettu hyvin huomioon rakennuttajan, rakennusliikkeiden, viranomaisten tai operaattorien taholta. Sisäkuuluvuusongelmat voivat kuitenkin keskittyä tiettyihin osiin rakennusta, kuten rakennusrungon keskelle tai alimpiin kerroksiin, myös aiheesta tehty aiempi tutkimus tukee tätä näkökulmaa [44]. Tällöin sisäkuuluvuusongelmien ennakointi voi olla haastavaa ja vaatii asiantuntemusta. Haastatteluiden perusteella myös uusien tiukempien energiatehokkuusvaatimusten ja matalaenergiarakentamisen välillä nähdään olevan selvä yhteys sisäkuuluvuusongelmiin, joka todennäköisesti on seurausta käytetyistä rakennusmateriaaleista ja metallin lisääntyneestä määrästä, sillä nimenomaan metallia sisältävät rakennusmateriaalit ovat haitallisia sisäkuuluvuuden kannalta.

Haastatteluiden aikana puheenaiheeksi nousi useampaan otteeseen rakennuksen sisäkuuluvuuteen liittyvät turvallisuuskäsitteet. Yleisesti ottaen hälyttäminen, kuten hätäpuhelut, koettiin tärkeäksi sekä parantavan kohteen yleistä turvallisuutta. Toinen merkittävä turvallisuuskäsitteellinen on viranomaisradioverkon sisäkuuluvuus. Tähän mennessä viranomaisradioverkon alempi 400 MHz:n taajuusalue on taannut sille paremman sisäpeiton verrattuna muiden operaattorien verkkoihin. Virve 2.0:n myötä viranomaisradioverkko siirtyy toimimaan kilpailutuksen voittaneen operaattorin 4G-verkon päälle, joka tarkoittaa karkeasti ottaen taajuusalueen kaksinkertaistumista. Taajuusalueen kasvattaminen 4G-taajuuksille tuo mukanaan riskit Virve-sisäpeiton heikkenemisestä. Tämä voi aiheuttaa esimerkiksi sisäantenniverkkojen saneeraustarpeita, joka tarkoittaa vähintään komponenttien päivittämistä verkoissa LTE-yhteensopiviksi, mutta voi tarkoittaa myös verkon laajempaa saneerausta, mikäli vaimennukset päätelaitteille kasvavat liian suuriksi. Arvioinnissa tulee huomioida etenkin viimeinen siirtotie, jossa radiosignaalin välittäjäaineena on ilma. Tulevaisuudessa voi siis ilmetä kohteita, joissa Virven sisäkuuluvuus on aiemmin ollut riittävä, mutta muutoksen myötä tarvitaan uusi sisätilaratkaisu. Vaikka täydellistä sisäpeittoa ei ole tähänkään mennessä voitu varmistaa, viranomaisradioverkon tärkeyttä eri tilanteissa ei missään nimessä tule väheksyä, sillä toimivat yhteydet ovat oleellisessa osassa turvaamassa viranomaisten toimintaa ja pelastustöiden johtamista.

Haastatteluiden perusteella on myös selvää, että sisäkuuluvuusongelmat eivät tule ainakaan vähenemään 5G:n laajemman käyttöönoton myötä. Oleellisena osana 5G-teknologiassa on entistä korkeampien taajuusalueiden hyödyntäminen, ensiksi 3,5 GHz:n taajuusalue, jonka myötä signaalin läpäisy rakennukseen on oleellisesti heikompaa, kuin alemmilla taajuuksilla. Vaikka 5G-teknologia ei ole tulevaisuudessa taajuussidonnaista, eli 5G-verkko voi toimia paremmin rakenteita läpäisevillä alemmilla taajuuksilla, kuitenkin korkeampaa taajuusaluetta ei voida kattavasti hyödyntää sisätiloissa. Voidaan arvioida, että suurin osa datasta kulutetaan rakennusten sisätiloissa, joissa on myös tarvetta suurille siirtonopeuksille. Korvattaessa kiinteitä yhteyksiä mobiiliyhteyksillä, tulee nopeiden mobiiliyhteyksien ja datamäärän kysyntä kasvamaan entisestään sisätiloissa. Tällä yhtälöllä on potentiaali entisestään kasvattaa sisäkuuluvuusongelmien määrää, jos sisäkuuluvuusasioita ei ole huomioitu riittävällä tasolla.

Energiatehokkuuteen liittyvän sääntelyn osalta ei ole lähitulevaisuudessa odotettavissa kevennyksiä rakennusten energiatehokkuusvaatimuksiin, joten tämän osalta rakennusten vaimennusten ei voida odottaa pienenevän oleellisesti, vaan sisäkuuluvuusongelmiin on etsittävä ja kehitettävä aktiivisesti muita ratkaisuja. Rakennuslalla on tutkittu ja esitelty mielenkiintoisia uusia tuotteita, joiden tarkoituksena on parantaa radiosignaalin läpäisyä rakenteissa. Näissä tuotteissa hyödynnetään esimerkiksi taajuusselektiivistä kuviointia sekä rakenteisiin integroituja passiivisia antennielementtejä. Samoin rakenteisiin tehtävien RF-aukkojen hyödyntämisestä radiosignaalin läpäisyn parantamiseksi on käyty paljon keskustelua. Edellä mainituin rakennusteknisiin ratkaisuihin on kuitenkin hyvin haastavaa tuottaa kattava sisäpeitto rakennukseen, mutta niitä voidaan hyödyntää erittäin onnistuneestikin ja saavuttaa tyydyttävä sisäpeitto riippuen kohteesta ja käyttäjän tarpeista.

7.2 Vastuu sisäkuuluvuudesta

Vastuukysymys sisäkuuluvuudesta rakennushankkeessa koettiin haastateltavien keskuudessa haastavaksi, jota se kieltämättä onkin. Maankäyttö- ja rakennuslain § 117 j mukaan rakennushankkeeseen ryhtyvän on kustannustehokkuus huomioon ottaen mahdollistettava riittävät edellytykset matkaviestinten kuuluvuudelle rakennuksessa. Käytännössä lakiteksti siis jättää rakennushankkeeseen ryhtyvälle liikkumavaraa sisäkuuluvuuden toteutustavan suhteen, mutta on samalla kuitenkin selkeästi velvoittava sisäkuuluvuuden suhteen. Pelastuslaki puolestaan velvoittaa, viranomaisen niin määrätessä, rakennuksen omistajaa hankkimaan viranomaisradioverkon sisäpeittoon tarvittavat laitteet sekä pitämään ne toimintakunnossa.

Hankalaksi vastuukysymys voidaan kokea monesta syystä. Näitä ovat esimerkiksi se, että sisäkuuluvuusongelmien todennäköisyyden arviointi on hankalaa, eikä sisäkuuluvuudesta voida varmistua riittävän ajoissa suunnittelupöydän ääressä, jolloin voidaan vaatia hyvinkin ripeitä toimia myöhemmissä vaiheissa rakennushanketta. Osittain tämän takia rakennuslalla ei ole vielä vakiintunutta käytäntöä sisäkuuluvuuden varmistamiseksi, vaan toimenpiteet riippuvat hyvinkin paljon itse rakennushankkeesta ja sen osapuolista.

Suuri osa sisäkuuluvuusratkaisuista edellyttää toimiakseen riittävää ulkopeittoa rakennuspaikalla, kun taas muut ratkaisut, kuten hajautettu sisäänantennijärjestelmä, vaativat nekin operaattorien palvelua toimiakseen. Operaattoreille on myös asetettu verkkotoimiluvissa väestöpeittovelvoitteita, jotka niiden tulee täyttää. Sisäkuuluvuuden varmistaminen vaatii siis toimia rakennushankkeeseen ryhtyvän lisäksi toimia myös

operaattorien osalta. Käytännössä sisäkuuluvuudesta voidaan nähdä olevan jaettu vastuu rakennushankkeeseen ryhtyvän ja operaattorin välillä, jossa kummankin tulee huolehtia omasta osa-alueestaan. Yhteistyön merkitystä myös tällä saralla ei voida olla liikaa korostamatta.

Viranomaisradioverkon kohdalla vastuukysymys ei kuitenkaan vaikuta yhtä haasteelliselta. Tähän voi vaikuttaa osaltaan selkeämpi lakiteksti sekä vakiintuneet toimintatavat Virven sisäpeiton toteuttamisen suhteen. Esimerkiksi isot ja kokeneet toimijat osaavat ottaa Virve-sisäpeiton rakennushankkeessa yleensä hyvin huomioon. Virve 2.0 ja siihen siirtymisen myötä nykyinen tilanne voi kuitenkin muuttua, kun viranomaisradioverkko siirtyy 4G-tekniikkaan ja uuden operaattorin vastuualueelle, jolloin toimintatavoissa tapahtuu vääjäämättä joitain muutoksia.

Lain edessä vastuuta on hankala siirtää eteenpäin. Rakennusallalla konsulttipalveluiden käyttö on kuitenkin yleistä, joka tekee tilanteesta hankalan, jos tilaaja uskoo ostavansa asiantuntevaa palvelua. Tämän takia myös viranomaisilla, kuten rakennusvalvonnalla, tulisi olla selkeä rooli ja oma vastuunsa sisäkuuluvuuden huomioimisesta vähintään lupavaiheessa. Kaksi vuotta sitten tehdyn lakimuutoksen tulisi näkyä selkeästi osana rakentamisprosessia ja myös sisäkuuluvuuden varmistamisen tulisi olla tältä osin tarvittaessa entistä enemmän viranomaisjohtoista muiden rakennuksille asetettujen vaatimusten ja määräysten ohella. Toisin sanoen, esimerkiksi rakennusvalvonnan tulisi varmistua, että sisäkuuluvuusasiat on huomioitu asianmukaisesti rakennushankkeessa.

Rakennushankkeen sisällä työnjako sisäkuuluvuuden varmistamiseksi voi olla yhtä lailla haastavaa ja siihen vaikuttavat hyvin pitkälle samat asiat kuin vastuukysymyksiin. Sisäkuuluvuuteen vaikuttaa monta tekijää, rakennusteknisistä ratkaisuksista teleteknisiin järjestelmiin ja niille tarvittaviin tilavarauksiin, joten sisäkuuluvuusratkaisut vaativat useamman suunnittelualan koordinoitua. Tämä tarkoittaa, että suunnittelijaryhmän sisällä vastuu sisäkuuluvuudesta on hajautettu eri suunnittelijoiden kesken ja suunnitteluryhmän yhteispelin tulee toimia myös käytännössä. Aiheen ollessa hyvin monitahoinen ja osapuolten määrä suuri, korostuu väistämättä yhteistyö sekä hankkeen koordinointi. Täten tilaajan ja rakennuttajan rooli on merkittävä hankkeen vetäjänä sisäkuuluvuuden varmistamiseksi, eikä vain vastuunkantavana osapuolena.

Tilaajataho ei kuitenkaan aina osaa ilmaista kantaansa ja mielipidettänsä hankkeen kannalta oleellisiin asioihin tarpeeksi selkeästi ja yksiselitteisesti. Monet esimerkiksi teknisten järjestelmien hankintaa, laajuutta tai laatua koskevat päätökset ovat loppupeleissä tilaajan tai rakennuttajan päätettävissä. Näissä tilanteissa ollaan konsultointipalvelun ytimessä, jolloin konsultin tehtävänä on osata esittää oikeita kysymyksiä ja herättää tarvittavaa keskustelua tietojen saamiseksi tilaajalta ja hankkeen viemiseksi eteenpäin. Näiden tietojen perustella konsultti voi esittää oma näkemyksensä ja arvionsa tilaajalle sekä tukea tilaajaa tarvittavien päätösten tekemisessä. Tärkeää konsultille on kuitenkin tarvittaessa osata olla tilaajan kanssa myös eri mieltä, jos valittu ratkaisu ei ole tilaajan tai muutoin yleisen edun mukainen. Haasteellisen tilanteesta voi tehdä esimerkiksi se, että tilaajan ja rakennuksen loppukäyttäjän näkemykset eivät aina kohtaa tasapuolisesti, jolloin konsultilla tulee olla selkeä yleiskuva hankkeesta ja sille asetetuista tavoitteista.

7.3 Sisäkuuluvuus osana rakennushankkeetta

Rakennushankkeet ovat aina yksilöllisiä projekteja ja harvoin tulee vastaan kahta samanlaista rakennushanketta, etenkin sisäkuuluvuuden osalta. Toisistaan poikkeavat rakennustyytit, vaihtuvat rakennuspaikat sekä hankkeen mukaan vaihtelevat sopimusmallit ja osapuolet aiheuttavat haasteita sisäkuuluvuuden varmistamiseksi rakennushankkeissa. Lisäksi sisäkuuluvuutta on haastavaa arvioida etukäteen ja tiedonvaihto voi olla vajavaista hankkeen aikana. Tämän takia yhtä yhtenevää ja selkeää menettelytapaa ei haastattelujen avulla löydetty, vaan yleiskuva sisäkuuluvuuden varmistamisesta jäi jokseenkin hajanaiseksi. Tulevaisuudessa sisäkuuluvuuden varmistamiseksi rakennushankkeissa tulisi löytää enemmän yhteneviä käytäntöjä ja selkeitä toimintamalleja täydentämään nykyisiä.

Rakennushankkeen osapuolten näkökulmat sisäkuuluvuuteen ja intressit rakennushankkeessa voivat olla hyvinkin eriäviä toisistaan. Tämä on osaltaan vaikuttanut alalla vallitsevaan tilanteeseen ja johtanut ristiriitoihin rakentamisessa. Vaikka haastateltavat olivat haastatteluissa hyvin avoimia ja pystyivät myös tarkastelemaan sisäkuuluvuutta objektiivisesti kokonaisuuden kannalta, haastatteluissa on kuitenkin paikoitellen havaittavissa haastateltavan aseman vaikutus haastattelutuloksiin.

Operaattorien osalta on selvää, että ensisijainen ja toivottu toteutustapa sisäkuuluvuudelle on toteuttaa sisäpeitto riittävän ulkopeiton avulla. Kaikissa rakennushankkeissa tämä ei ole teknisesti tai taloudellisesti mahdollista, jolloin joudutaan turvautumaan erilliseen sisätilaratkaisuun. Operaattorien on kuitenkin osaltaan harkittava kyseistä sisätilaratkaisua, kuten liittymistä käyttäjän antenniverkkoon palvelun lisäksi taloudellisesta näkökulmasta. Aina operaattorin ei ole kannattavaa rakentaa liittymää ja ylläpitää tukiasemaa rakennuksessa. Rakennusliikkeen näkökulmasta vuorostaan rakennuksen ulkovaippaan ja julkisivuun muutosten tekeminen voi olla aikaa vievää ja kallista, sisältäen useita haasteita, jolloin esimerkiksi erillinen sisäantenniverkko on houkutteleva vaihtoehto. Rakennusliikkeiden näkökulmasta sisäpeiton toteuttaminen vain rakennusteknisin ratkaisuin sisältää lisäksi riskin ulkopeiton tasosta, jolloin sisäpeitto voidaan kuitenkin joutua toteuttamaan joka tapauksessa teleteknisellä ratakisulla. Tämä operaattorien ja rakennusliikkeiden välinen näkemysero on ehkä suurin näkemysero liittyen sisäkuuluvuuteen. Suunnittelijat ja urakoitsijat voivat pyrkiä vaikuttamaan sisäkuuluvuusratkaisuun suuntaan tai toiseen riippuen omasta tilanteestaan, kuten osaamistasosta tai aikataulusta.

Osa haastateltavista näki selvästi nykyisen sääntelyn osittain riittämättömänä varmistamaan riittävää sisäkuuluvuutta, mutta suurin osa haastateltavista ei lähtökohtaisesti toivonut lisää tai entistä velvoittavampaa lainsäädäntöä. Lainsäädännön ja sääntelyn lisääminen johtaa yleensä hyvin väkinäiseen ja pakotettuun lopputulokseen, sen sijaan yhdessä sopimalla ja yhteisellä ohjeistuksella päästäisiin varmemmin tasapuoliseen lopputulokseen. Sääntelyn lisäämisen ja tiukentamisen sijaan ratkaisuna voisi olla yhteisen ohjeistuksen ja viranomaisjohtoisuuden lisääminen. Aiheesta kirjoitetut ohjekortit [18, 37] ovat hyviä, mutta tietoa suunnittelijoiden ja rakennuttajien parissa tulisi kuitenkin lisätä. Tämän lisäksi rakennusvalvonta- ja pelastusviranomaisella tulisi jatkossa olla aktiivinen rooli sisäkuuluvuuden varmistamiseksi.

Samat lainalaisuudet pätevät myös sisäverkkojen osalta niin uudis- kuin korjausrakentamisessa. Sisäkuuluvuuden osalta tarvekartoitus ja hankesuunnittelu ovat tärkeitä vaiheita, kun tehdään sisäkuuluvuusratkaisuja koskevia määrittelyjä, sillä näissä vaiheissa tuotettuja dokumentteja, kuten hankesuunnitelmaa, käytetään myöhemmän suunnittelun lähtötietoina ja ne ovat hyvin määräävässä asemassa sisäkuuluvuushankkeen etenemisessä.

Osana sisäkuuluvuushanketta tehtävät kuuluvuuskartoitukset ja mittaukset tulee suunnitella huolellisesti niin, että myös muun rakennushankkeen eteneminen on otettu huomioon. Etenkin rakentamisen aikana ja hankkeen loppuvaiheessa tehtävät mittaukset investointipäätöksen varmistamiseksi on harkittava ja suunniteltava tarkasti. Rakennuksen ulkovaipan on oltava käytännössä valmis, jotta mittauksista saadaan luotettavat tulokset, mutta osapuolille on myös jätävä riittävästi aikaa reagoida mittaustuloksiin. Mahdollinen sisäverkko tulisi pystyä rakentamaan muiden rakennustöiden kannalta oikea-aikaisesti, ilman että siitä syntyy merkittäviä lisätoita ja -kustannuksia tai viivästyksiä. Pahimmillaan keskeneräinen sisäverkko ja sen rakentaminen voivat viivästyttää koko rakennuksen käyttöönottoa.

Ulkovaipan valmistumisen jälkeen tehtävien mittausten tarvetta olisi mahdollista vähentää esimerkiksi suunnitteluvaiheessa tehtävien simulointien avulla. Simuloinnissa tulisi ottaa huomioon sisäkuuluvuuteen vaikuttavat tekijät mahdollisimman laajasti, jolloin sisäverkon tarve pystytään kartoittamaan ajoissa ja investointipäätöstä ei ole tarvetta siirtää. Simulaatiomallia tulisi pyrkiä hyödyntämään tämän jälkeen myös mahdollisessa sisäverkon jatkosuunnittelussa. Tällä hetkellä eri ohjelmistoilla tehdyt tietomallit eivät ole keskenään yhteensopivia, joka vähentää simulointien käyttöä suunnittelussa. Tietomallipohjaisen suunnittelun yleistymisen myötä toivottavasti jossain vaiheessa eri ohjelmistoilla tehtyjen mallien tietoja pystytään hyödyntämään ristiin kattavasti, jolloin mahdollisesti myös suunnittelutarkkuus täsmentyisi.

7.4 Sähkösuunnittelijan toimintaedellytykset

Useammassa haastattelussa tuotiin hyvin selkeästi esille, että sähkösuunnittelijalla ja sähkösuunnittelutoimistoilla ei ole aina riittäviä toimintaedellytyksiä liittyen sisäantenniverkkojen suunnitteluun. Haastatteluiden perusteella yhtenä oleellisimmista syistä tähän on sähkösuunnittelutoimistojen heikko osaaminen sisäverkkoratkaisuista ja radiotekniikasta.

Keskeinen syy sähkösuunnittelijoiden ja -toimistojen puutteelliseen osaamiseen liittyen sisäkuuluvuuteen ja siihen liittyviin järjestelmiin on sähkösuunnittelijoiden koulutuksessa. Koulutusohjelmissa, joista sähkösuunnittelijoita pääsääntöisesti työllistyy, ei juurikaan käsitellä sisäkuuluvuutta tai radiotekniikka. Hyvänä esimerkkinä tästä on kirjoittajan oma koulutushistoria, jossa sähköisen talotekniikan insinöörin sekä diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelmissa ei käsitelty sisäkuuluvuutta tai radiotekniikka ollenkaan ennen tämän diplomityön aloittamista. Tämä diplomityö on siten toiminut kirjoittajalleen hyvänä perehdytyksenä aiheeseen.

Suoraviivaisena ratkaisuna olisi sisällyttää radiotekniikkaan, sisäkuuluvuuteen ja esimerkiksi sisäantenniverkkoihin liittyviä opintoja alan koulutusohjelmiin. Toisaalta on ymmärrettävä, että sähkösuunnitteluala on hyvin moninainen ja pitää sisällään lukuisia eri järjestelmiä, jolloin kaikkien järjestelmien sisällyttäminen ja kattava käsittely opinto-ohjelmassa on vähintäänkin haastavaa. Tällöin on hyväksyttävä, että joitain, etenkin yleisesti vastaan tulevia aiheita käsitellään laajemmin, kun taas toiset, harvinaisemmat

aiheet jäävät vähälle huomioille. Koulutuksessa tulisi kuitenkin pyrkiä tilanteeseen, jossa on tosiasiallisesti mahdollisuus tutustua kaikkiin tarpeellisiin aiheisiin edes pintapuolisesti, joka helpottaisi tarvittaessa asiaan perehtymistä jälkeensä työelämässä. Tällä hetkellä moni työelämässä tärkeänä pidetty aihealue, etenkin tietoteknisten järjestelmien osalta, sivuutetaan alan koulutuksessa kokonaan. Monessa koulutusohjelmassa painopiste on hyvin pitkälti vahvavirtajärjestelmissä, jolloin nimenomaan telejärjestelmien käsittely jää vähemmälle.

Sisäantenniverkko tai muu sisäkuuluvuusratkaisu toteutetaan vain harvoin kohteisiin, ja tämä on osaksi syynä siihen, miksi aihe on myös koulutusohjelmissa jäänyt huomioimatta. Tämä on edesauttanut tiedon keskittymistä alalla vain tietyille henkilöille ja suunnittelutoimistoille. Tämän lisäksi tieto on ollut alalla hajaantunutta, jota myös tämä työ osaltaan pyrkii korjaamaan. Ratkaisuna tulisi lisätä tietoa sisäkuuluvuudesta ja sisäverkkoratkaisuista alalla. Vaihtoehtoina tähän on esimerkiksi peruskoulutuksen parantaminen, lisäkoulutuksen järjestäminen sekä kattavien suunnittelu- ja ohjemateriaalien tuottaminen.

Sähkösuunnittelijan toimintaedellytyksiä ja sisäkuuluvuushankkeen onnistumisen todennäköisyyttä heikentävät myös tilaajan tai rakennuttajan taholta puutteelliset tilaukset ja määrittelyt perinteisissä toteutusmuodoissa. Rakennushankkeessa ei välttämättä ole alkuunkaan huomioitu sisäkuuluvuutta, jolloin se voi tulla tilaajalle ja lisäksi myös suunnittelijalle yllätyksenä. Haastatteluiden perusteella käy myös ilmi, että monesti sisäpeiton laajuutta tai laatua koskevat määrittelyt voivat olla hyvinkin puutteellisia. Tilaajan ja muiden suunnittelijoiden tahoilta vaaditaan siis enemmän tietoa ja osaamista aiheesta, etenkin jos sähkösuunnittelijaa ei ole hankkeessa mukana. RT-kortin kirjoittamisen, tehdyn tutkimuksen, julkisen keskustelun ja maankäyttö- ja rakennuslain muutoksen myötä edistystä tässä suhteessa on varmasti jo tapahtunut ja sisäkuuluvuutta huomioidaan aiempaa kattavammin rakennushankkeissa.

Haastateltavien keskuudessa eniten mielipiteitä jakoi sähkösuunnittelijan rooli liittyen sisäverkkojen suunnitteluun ja toteutukseen. Etenkin osa haastateltavista näki sisäverkkojen suunnittelun sisällyttämisen sähkösuunnitteluun ja -urakointiin ongelmana, kun taas osa haastateltavista oli vahvasti sitä mieltä, että sisäverkkojen suunnittelu tulisi aina sisällyttää sähkösuunnitteluun. Sinällään tämä ristiriita oli odotettavissa huomioiden haastateltavien eroavat näkökulmat, koska haastateltavien valinnassa tarkoituksenmukaisesti haettiin monipuolista otantaa sähköalalta.

Sisäverkkojen suunnittelu on kuitenkin jatkossa edelleen hyvä sisällyttää sähkösuunnitelmiin ja -urakkaan, sillä muutakaan sopivaa paikkaa sille ei tunnu rakennushankkeesta löytyvän. Tavalliseen rakennushankkeeseen sisältyy lukuisia sähkö- ja tietoteknisiä järjestelmiä, ja jos jokainen järjestelmä katsottaisiin omaksi erikoissuunnittelu tai -urakointialaksi kasvaisi hankkeissa osapuolten määrä moninkertaiseksi, joka taas vaikeuttaa yhteensovitusta ja työmaan hallintaa. Erityisesti sähkösuunnittelijalla on rakennushankkeessa rooli yhteensovittaa, koordinoida ja dokumentoida rakennuksen sähkö- ja tietoteknisiä järjestelmiä. Haastateltavat ovat ainakin osittain samalla linjalla, että sisäverkkojen suunnittelu tulee jatkossakin sisällyttää sähkösuunnitelmiin ja pyrkiä parantamaan sähkösuunnittelijan toimintaedellytyksiä sisäverkkojen suunnittelun osalta. Tämä ei kuitenkaan tarkoita, että sähkösuunnittelijan tulee aina itse toimia kaikkien järjestelmien tosiasiallisena suunnittelijana. Tilanteessa, jossa toimiston sisältä ei löydy tarvittavaa osaamista, sitä on suotavaa hankkia tai esimerkiksi teettää kyseiseen järjestelmään liittyvä suunnittelu alihankintana.

Koulutuksen ja ohjeistuksen lisäämisen ohella sisäkuuluvuutta voidaan rakennushankkeen aikana pyrkiä varmistamaan myös suunnittelijan taholta tiiviillä yhteistyöllä operaattorien ja Erillisverkkojen kanssa. Rakennushankkeessa on kiinteistön omistajan ja operaattorien etu, jos tasapuolisella ja tiiviillä yhteistyöllä olisi myös mahdollista varmistaa hyvä alueellinen ulkopeitto ja sisäkuuluvuus varaamalla tukiasemille tarvittavat tilat, kaapelireitit ja sähkönsyöttö sopivassa vaiheessa hanketta muiden tietoliikenneyhteyksien ohella.

Tietokoneavusteinen suunnittelu on kehittynyt rakennus- ja sähköalla huomattavasti kuluneen vuosikymmenen aikana, etenkin rakennusten tietomallin käytön osalta. Erilaisten ohjelmistojen hyödyntäminen ei ole kuitenkaan vallannut kaikkea suunnittelua kokonaisuutena, vaan edelleen osa suunnittelusta tehdään perinteiseen tapaan. Tämän lisäksi ongelmat eri tiedostotyyppien ja ohjelmien keskinäisessä yhteensopivuudessa aiheuttavat haasteita uusien ohjelmistojen käyttöönotossa. Tällä hetkellä ei ole tiedossa, että sisäkuuluvuuden ja sisäverkkojen suunnittelussa käytettäisiin apuna laajamittaisesti tietomallia tai simulointiohjelmiä. Todennäköisesti tulevaisuudessa yhteensopivat laskenta- ja simulointiohjelmat yleistyvät myös suunnittelutoimistojen käytössä. Osaltaan simuloinnilla voitaisiin pienentää sisäverkkojen suunnittelussa tapahtuvia virheitä ja päästä entistä tehokkaampaan lopputulokseen järjestelmän mitoituksen osalta. Samalla myös sisäverkkojen hyvään suunnitteluun tarvittavan tiedon ja kokemuksen määrää voidaan pienentää.

Yhteistoiminnallisia toteutusmuotoja, kuten allianssimallia hyödyntämällä, rakennushankkeessa on mahdollista päästä perinteisiä toteutusmuotoja parempaan lopputulokseen myös sisäverkkojen osalta. Toisin kuin perinteisissä toteutusmuodoissa, joissa suunnittelijan ja urakoitsijan roolit ovat hyvin tarkasti määrättyjä, voidaan allianssissa hyödyntää eri osapuolten osaamista tehokkaasti. Yhteinen tavoite sekä jaetut riskit ja hyödyt kannustavat osapuolia tiiviimpään yhteistyöhön, joka osaltaan myös edesauttaa esimerkiksi hyvän sisäkuuluvuuden varmistamista rakennushankkeessa. Suomessa allianssi on kuitenkin rakennushankkeen toteutusmuotona toistaiseksi hyvin tuore. Allianssin osapuolet ja sopimukset myös vaihtelevat, jolloin etenkin tilaajan näkökulmasta hankkeeseen voi liittyä riskejä, kuten allianssin tuoman lisäarvon suhteen verrattuna perinteisiin toteutusmuotoihin.

7.5 Laite- ja tilavaraukset

Rakennushankkeen alussa suunniteltavat sekä rakentamisen aikana tehtävät laite- ja tilavaraukset eri järjestelmille ovat tärkeitä ja arvokkaita, sillä ilman kunnollisia varauksia on jälkeempään toteutettavilla lisäyksillä merkittävästi korkeammat kustannukset. Tämän lisäksi ylimääraisistä rakennustöistä voi aiheutua enemmän haittaa rakennuksen käyttäjälle. Rakennushankkeen kokonaiskustannuksiin verrattuna varausten hintavaikutukset jäävät tyypillisesti hyvin pieniksi, kun ne tehdään riittävän ajoissa, mutta maksavat itsensä hyvin nopeasti takaisin, jos lisäyksiä tehdään myöhemmin. Tehtäviin varauksiin yleisesti kuuluvat tarvittavan asennustilan varaaminen laitteille ja keskuksille sekä varautuminen kaapelireittien ja putkitusten osalta rakennuksessa. Vierekkäisten rakennusten välille on myös hyvä varata riittävästi varaputkia myöhempiä yhteyksiä ja kaapelivetoja varten.

Sisäkuuluvuutta on luonnehdittu dynaamiseksi ominaisuudeksi, joka tarkoittaa, että kuuluvuus rakennuksessa voi vaihdella ajan mittaan riippuen ympärillä tapahtuvista muutoksista ympäröivässä rakennusmassassa, tukiasemapaikoissa ja käytettävissä taajuuksissa. Sisäkuuluvuudesta ei siis voida varmistua koko rakennuksen elinkaaren

ajaksi yhdellä kertaa, kuten monesta muusta rakennuksen ominaisuudesta, jotka ovat staattisia, kuten lämmöneristävyys. Lisääntyneistä sisäkuuluvuusongelmista ja kuuluvuuden dynaamisesta luonteesta johtuen suositellaan kaikkiin uudisrakennukseen tehtäväksi tilavauraukset myös erilliselle sisäverkkoratkaisulle, kuten hajautetulle sisäantennijärjestelmälle. Uusissa rakennuksissa, joissa on mahdollista, että tukiasema sijoitetaan rakennukseen, kannattaa esimerkiksi pääkeskukseen varata tukiasemaa varten oma lähtö ja mittaripaikka lähes poikkeuksetta. Haastatteluissa tuotiin esiin myös uudistuotannossa varautuminen hyvänä ja suositeltavana asiana, sillä tulevaisuudessa sisäkuuluvuusongelmien ja -ratkaisuiden nähdään yleistyvän. Hyvin suunniteltua ja toteutettua WLAN-verkkoa voidaan pitää myös jonkin asteisena varautumisena mahdollisiin sisäkuuluvuusongelmiin tulevaisuudessa, sillä kattavassa ja hyvin toimivassa lähiverkossa voidaan hyödyntää Voice over Wi-Fi -puheluita. Työtä tehdessä ei kuitenkaan selvinnyt voidaanko Voice over Wi-Fi -verkkoa käyttää ainoana sisäkuuluvuuden ratkaisuna koko rakennuksessa. Teknistä estettä tälle ei pitäisi olla.

Sisäverkkoratkaisuiden laite- ja tilavarauksista on sähköalalla saatavilla vähänlaisesti ohjeistusta. Sisäantenniverkkoja käsittelevässä ST-kortissa [37] on yleisiä ohjeita tarvittavista varauksista, mutta ei yksityiskohtaisia ohjeita. Tärkeää on kuitenkin huomioida laittilaan mahdollisesti asennettavien aktiivilaitteiden, tukisemien ja akustojen tilatarpeet. Ulkomittojen ja vapaan huoltotilan lisäksi etenkin akustojen osalta tulee huomioida niiden painon asettamat vaatimukset lattiarakenteille. Laitteiden osalta tärkeää on huomioida riittävä ilmanvaihto, jäähdytys, sähkönsyöttö ja siirtoyhteydet.

Laitetilan sijoituksessa ja valinnassa tulisi huomioida ainakin liittymistapa sisäverkkoon, käytettävissä olevat kaapelireitit, verkon topologia ja rakennuksen geometria. Tilan sijoittamisessa rakennukseen tulee myös huomioida kulunvalvonta, huollettavuus ja haalausreitit. Käytännössä operaattoreilla on hyvin samantapaiset vaatimukset kiinteistöön sijoitettavien laitetilojen osalta kuten esimerkiksi jakeluverkkoyhtiöillä. Laite- ja teknisten tilojen varaaminen tai lisääminen rakennukseen ei ole kuitenkaan käytännössä yksinkertaista. Laite- ja tekniset tilat ovat edelleen hankalia sijoittaa rakennukseen ja niiden tilantarve voi kilpailla käyttäjän kannalta oleellisten tilojen kanssa. Pienikin määrä niin sanottuja hukkaneliöitä näkyy rakennusliikkeen tai omistajan katteessa.

Sisäantenniverkon tilanvarauksissa ja suunnittelussa voidaan soveltuvin osin noudattaa Viestintäviraston määräystä kiinteistön sisäverkoista ja teleurakoinnista (65 D/2019 M) [45] sekä Viestintäviraston suositusta kiinteistöjen laitetilojen lukituksesta (306/2019 S) [46]. Yhtenä vaihtoehtona nykyisen sääntelyn tarkentamiseksi olisi käsitellä M65-työryhmässä matkaviestinten sisäkuuluvuutta ja sisäantenniverkkoa sekä mahdollisesti sisällyttää joukkoviestinnänverkon lisäksi Viestintäviraston määräykseen 65 myös matkaviestinverkon välittämiseen käytettävät antennijärjestelmät.

Tavallisen rakennuksen elinkaaren ollessa useita kymmeniä vuosia, on ymmärrettävää, että mahdollisuuksien mukaan tulisi varautua käyttäjän tuleviin tarpeisiin myös kiinteistön sisäverkkojen osalta. Käytännössä varautumisen edellyttäminen on ongelmallista, sillä tulevaisuudessa käytettäviä teknologioita ja niiden asettamista teknisistä vaatimuksista ei ole tietoa. Tällä hetkellä esimerkiksi 5G:n asettamista vaatimuksista ja niiden vaikutuksista sisäverkkoihin ei ole tarkkaa tietoa, mutta ratkaisuiden odotetaan vakiintuvan 5G:n osalta nopeasti seuraavien vuosien aikana. Matkaviestinverkkojen osalta ollaan tällä hetkellä murrosvaiheessa, jossa ei voida olla varmoja pystytäänkö jatkossa uusia teknologioita hyödyntämään totuttuun tapaan nykyisen kaltaisissa sisäverkoissa.

7.6 Tulevaisuuden näkymiä

Haastatteluiden perusteella voidaan päätellä, että sisäkuuluvuusongelmien ja sitä myötä myös erillisten sisätilaratkaisuidenkin odotetaan yleistyvän tulevaisuudessa.

Sisäkuuluvuusratkaisuiden teknisiin yksityiskohtiin on kuitenkin hankalaa ottaa kantaa, eikä kovin moni haastateltava avannut odotuksiaan näiltä osin.

Monissa muissa järjestelmissä kuitenkin selvästi erottuu trendi, jossa IP-rajapinta siirtyy koko ajan lähemmäs käyttäjää ja päätelaitetta, mahdollistaen entistä suuremman datamäärän tehokkaan siirtämisen verkossa. Tämän lisäksi tietotekniikan kehittyessä verkot levittäytyvät vauhdilla entistä laajemmalle ja uusia verkkopohjaisia ratkaisuja tulee lisääntyvissä määrin markkinoille, hyvänä esimerkkinä tästä on esineiden internet, eli Internet of Things (IoT). Langattomuus tarjoaa kustannustehokkaan tavan liittää suuren määrän laitteita verkkoon, mutta se vaatii myös sisäkuuluvuuden asennuspaikalla.

Lisääntyneiden kuuluvuusvaatimusten ohella myös tulevaisuuden sisäverkoissa yhtenä ratkaisuna voi olla IP-rajapinnan siirtäminen lähemmäs loppukäyttäjää, eli lähemmäs sisäantennia. Taajuusalueiden ja modulaatiotasojen kasvaessa, radiotaajuuksin siirrettävän matkan pituutta on kannattavaa lyhentää, jolloin aktiivilaitteita tulee sijoittaa rakennukseen enemmän ja laajemmin. Uusien teknologioiden asettamien entistä korkeampien vaatimusten myötä nykyisen kaltainen hajautettu sisäantennijärjestelmä, jossa rakennuksessa on käyttäjän hallinnoima laaja passiivinen antenniverkko ja operaattorin hallinnoima tukiasema keskitetysti laitetilassa, voi olla jäämässä historiaan.

Ratkaisuna uusien teknologioiden kasvaville vaatimuksille voisi olla niin sanottu hybridi-sisäverkko, jossa verkon aktiivilaitteet on sijoitettu hajautetusti rakennukseen kerros- ja aluekohtaisesti, kuten esimerkiksi yleiskaapelointijärjestelmässä on tapana tehdä. Nousukaapelointi kerrokseen toteutetaan kuitukaapeloinnilla, jolloin signaali siirrettäisiin radiotaajuuksin kerroksissa vain lyhyen matkaa jakamotiloista antennille koaksiaalikaapelilla. Erilaisia vaihtoehtoja varmasti tutkitaan parhaillaan.

Edellä mainitun kaltainen hybridi-sisäverkko vaatisi kuitenkin sopivien tuotteiden kehityksen ja testaamisen lisäksi mahdollisesti sääntelyn muuttamista. Sisäverkko, jossa operaattorin hallinnoimia aktiivilaitteita on ympäri rakennusta voi olla kaikille osapuolille epäedullinen ratkaisu. Tämän takia rakennuksen omistajalla voisi olla mahdollisuus esimerkiksi käyttää määräykset täyttävässä sisäverkoissa operaattorin ja viranomaisten hyväksymiä aktiivilaitteita.

Kotitukiasemaratkaisut, kuten femtosolut, muistuttavat osittain edellä ehdotettua ratkaisumallia. Femtosolujen odotettiin yleistyvän myös Suomessa jo 4G-verkkojen myötä, mutta toistaiseksi näin ei ole käynyt. Tulevaisuus näyttää miten ratkaisut kehittyvät 5G:n yleistymisen myötä. Joka tapauksessa teknologian kehittyessä keskustelu uusista ratkaisuista on tervetullutta. Esimerkiksi parissa haastattelussa tuotiinkin esiin ajatuksia herättävänä kysymyksenä, että missä vaiheessa tulisi jo alkaa varautumaan 6G-teknologian jalkautumiseen.

8. Yhteenveto

Diplomityön tavoitteena oli tarkastella mahdollisia syitä, ratkaisuja sekä rakennushankkeen eri osapuolten näkemyksiä liittyen rakennusten sisäkuuluvuusongelmiin. Tämän perusteella tavoitteena oli arvioida sähkösuunnittelijan toimintaedellytyksiä sisäkuuluvuushankkeissa ja pyrkiä selkeyttämään sähkösuunnittelijan toimenkuvaa sekä selvittää sähkösuunnittelussa käytettäviä toimintamalleja liittyen sisäkuuluvuuteen. Mahdollisuuksien mukaan työssä pyrittiin myös kartoittamaan sähköalalla mahdollisesti vallitsevaa yhteistä näkemystä liittyen rakennuksen sisäkuuluvuuteen.

Haastattelututkimus valikoitui työn tutkimusmenetelmäksi kirjallisuuskatsauksen ohella. Kirjallisuuskatsauksella saavutettiin työlle ja sen johtopäätöksille tarvittava teoreettinen pohja sekä koottiin aiheesta kiinnostuneille tietopaketti ja tarvittavat viitteet lisätutkimusta varten tiivistettynä yhteen paikkaan. Haastattelututkimuksella pyrittiin nimenomaan kartoittamaan rakennushankkeen eri osapuolten näkemyksiä sekä selvittämään aiheesta alalla olevaa kokemuseräistä tietoa. Tämä näkyi myös haastateltavien valinnassa, sillä työtä varten pyrittiin haastattelemaan eri osapuolia mahdollisimman kattavasti ja tasapuolisesti. Haastattelututkimus oli kvalitatiivinen, eli laadullinen ja haastattelut suoritettiin teemahaastatteluina puolistrukturoidusti. Haastattelututkimus osoittautui onnistuneeksi valinnaksi ja se toi työlle merkittävää lisäarvoa, haastattelututkimuksen ollessa tekniikan aloilla, etenkin opinnäytetöissä, mahdollisesti harvemmin käytetty tutkimusmenetelmä. Haastateltavat toivat esiin uusia näkökulmia sekä tietoa, joka ei olisi tullut pelkän kirjallisuuskatsauksen pohjalta esille. Lisäksi haastatteluiden mittaan selvisi ne aiheet, jotka koettiin haastateltavien keskuudessa oleellisiksi, joka osaltaan ohjasi työtä keskittymään nimenomaan työelämässä tärkeäksi koettuihin aihealueisiin.

Haastatteluissa tietoa tuli esiin erittäin laajasti ja monialaisesti. Tämän lisäksi esiin tuli paljon yksityiskohtaisia ohjeita, mutta työssä pyrittiin keskittymään nimenomaan rakennushankkeen ja sisäkuuluvuuden kokonaisuuden kannalta oleellisiin aiheisiin, jonka seurauksena kaikkea teknisiin ratkaisuihin liittyvää tietoa ei pystytty dokumentoimaan työhön. Työn perusteella saadaan kattava yleiskuva sisäkuuluvuuteen liittyvistä riskeistä sekä kuinka se voitaisiin huomioida entistä paremmin hankkeissa. Teknisen tietämyksen lisäksi haastattelututkimus paransi esimerkiksi kirjoittajan kommunikointi- ja organisointitaitoja sekä suurten tietomäärien käsittelyn tehokkuutta.

Haastatteluiden perusteella pystyttiin kartoittamaan sisäkuuluvuuteen liittyviä ongelmia ja riskejä riittävän laaja-alaisesti, kiinnittäen huomioita etenkin sähkösuunnittelijan rooliin. Työssä tuotiin kootusti esiin ja käsiteltiin monipuolisesti sisäkuuluvuuteen liittyviä ongelmakohtia ja esitettiin mahdollisia ratkaisuja. Osa ratkaisuihin on hyvin käytännönläheisiä, kun taas toiset ovat luonteeltaan enemmänkin keskustelua herättäviä.

Sisäkuuluvuusongelmia voidaan sanoa esiintyvän etenkin rakennusmassaltaan isoissa ja laajoissa rakennuksissa. Tämän lisäksi matalaenergiarakentamisella nähdään olevan selkeä yhteys sisäkuuluvuusongelmiin, joka on hyvin linjassa työn teoriaosuuden ja aiemman tutkimuksen kanssa. Taajuusalueiden kasvattamiseen liittyvät riskit tuotiin työssä esiin 5G:n ja Virve 2.0:n osalta sekä käsiteltiin sisäkuuluvuutta myös yleisesti turvallisuuskulmasta.

Sähkösuunnittelijan toimintaedellytykset ja rooli sisäkuuluvuushankkeessa tulivat haastatteluiden myötä keskeiseksi osaksi johtopäätöksiä. Sähkösuunnittelutoimistojen vaihtelevan osaamistason vuoksi kehityskohtia löydettiin etenkin liittyen

sähkösuunnittelijan rooliin. Osaltaan vajavaiset määrittelyt tilaajan taholta heikentävät entisestään suunnittelijan toimintaedellytyksiä. Radiotekniikkaa ja sisäverkkojen suunnittelua selkeästi ei käsitellä edes välttävästi alan koulutusohjelmissa, mikä on tyypillistä muutoinkin tietoteknisten järjestelmien osalta. Tämän lisäksi tieto ja ohjeistus aiheesta on hajaantunutta alalla, mikä on osaltaan edesauttanut osaamisen keskittymistä tietyille henkilöille ja toimistoille. Sähkösuunnittelijan rooli nähdään yhä enemmän sähkö- ja tietoteknisten järjestelmien kokonaisuuden hallitsemisessa ja koordinoinnissa. Etenkin tilaajan ja rakennuttajan näkökulmasta sisäverkkojen suunnittelu on jatkossakin hyvä sisällyttää sähkösuunnitelmiin ja -urakkaan, jolloin rakennushankkeen koordinointi ja työmaan hallinta yksinkertaistuu. Tarvittaessa erikoisosaamista vaativat tehtävät tulisi teettää alihankintana. Oleellisena osana sisäkuuluvuushankkeeseen kuuluu myös vuoropuhelu operaattorien kanssa. Tiiviillä yhteistyöllä operaattorin, tilaajan ja laitevalmistajien kanssa voidaan sähkösuunnitelmien nykyistä laatua parantaa oleellisesti. Allianssimallilla on myös mahdollista varmistua etenkin laadusta ja aikataulusta, hyödyntämällä osaamista tehokkaasti hankkeen sisällä. Lisäksi kuuluvuuskartoitukset ja mittaukset nähtiin oleellisena osana sisäkuuluvuushanketta.

Vastuukysymys sisäkuuluvuudesta koettiin haastateltavien keskuudessa hankalaksi. Työn perusteella voidaan todeta vastuun sisäkuuluvuudesta jakautuvan rakennushankkeeseen ryhtyvän tai omistajan ja operaattorien välillä. Suunnitteluryhmän sisällä voidaan nähdä työnjaon ja vastuun olevan niin ikään hajautunutta. Haastateltavat toivovat jatkossa rakennuslalle selkeämpää ohjeistusta ja yhdessä sovittuja toimintamalleja sisäkuuluvuuden varmistamiseksi. Sisäkuuluvuusongelmien todennäköisyys ja niihin liittyvät riskit tulee kuitenkin arvioida hankekohtaisesti. Viranomaisjohtoisuus koetaan myös jatkossa tärkeänä osana sisäkuuluvuuden varmistamista, sillä maankäyttö- ja rakennuslain muutoksen myötä rakennusvalvonnalla on oma vastuunsa varmistaa, että myös sisäkuuluvuus on todella huomioitu hankkeessa.

Diplomityölle asetettu laajuus ja aikataulu kuitenkin rajoittivat työn aikana saatuja tuloksia ja niiden perusteella tehtyjä johtopäätöksiä. Kattavampaan lopputulokseen ja nykyisiä konkreettisimpiin johtopäätöksiin olisi ollut mahdollista päästä kasvattamalla haastateltavien lukumäärää ja suorittamalla useammasta erilaisesta rakennushankkeesta tapaustutkimukset, eli niin sanotut case-tutkimukset. Tämän lisäksi matala lähtötaso radiotekniikasta näkyy mahdollisesti työstä paikoitellen, mutta tällä ei koettu olevan merkittävää vaikutusta työn lopputulokseen, vaan jopa päinvastoin, työssä pystyttiin tarkastelemaan sisäkuuluvuutta objektiivisemmin ja osittain ulkopuolisen näkökulmasta.

Työn ulkopuolelle rajattu, mutta monen haastateltavan tärkeänä pitämät aluerakentamishankkeiden ongelmat ja niiden koordinointi sisäkuuluvuuden suhteen olisi luonteva aihe jatkotutkimukselle operaattorien tai aluerakentamiseen osallistuvien rakennusliikkeiden näkökulmasta. Samoin sisäkuuluvuusratkaisujen sopivuutta eri kohteisiin kannattaisi arvioida teknistaloudellisella tarkastelulla entistä täsmällisemmän ohjeistuksen tuottamiseksi. Lähivuosina on odotettavissa tärkeitä tutkimustuloksia 5G-ominaisuuksien kustannustehokkaasta hyödyntämisestä ja ratkaisuista sisäverkoissa, joko nykyiseltä säädäntöpohjalta tai kohdistuen muutospaineen sääntelyyn.

Työn toimeksiantajan, Insinööri-toimisto Stacon Oy:n, kannalta on tärkeää jatkaa toimiston osaamisen kehittämistä sisäkuuluvuuden ja sisäverkkojen suunnittelun osalta myös tulevaisuudessa. Mahdollisen lisäkoulutuksen ohella seuraavaan sisäantennijärjestelmän sisältävään projektiin liittyen on tärkeää muodostaa hyvä yhteistyökanava operaattoreihin ja laitetoimittajiin. Tämän lisäksi jatkuva kehitystyö on tärkeässä osassa, jotta hyvät laskenta- ja suunnitelmapohjat saadaan tuotettua ja pidettyä ajantasaisina uusien projektien ja myös laadunvarmistuksen näkökulmasta.

Viitteet

- [1] Asp, A., Sydorov, Y., Valkama, M., & Niemelä, J. Radio signal propagation and attenuation measurements for modern residential buildings. *2012 IEEE Globecom Workshops*, Anaheim, CA, 2012, s. 580-584.
DOI: 10.1109/GLOCOMW.2012.6477638.
- [2] Asp, A., Sydorov, Y., Kesikastari, M., Valkama, M., & Niemelä, J. Impact of Modern Construction Materials on Radio Signal Propagation: Practical Measurements and Network Planning Aspects. *2014 IEEE 79th Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, Seoul, 2014, s. 1-7.
DOI: 10.1109/VTCSpring.2014.7022939.
- [3] Kesikastari, M. Matkapuhelinverkkojen kuuluvuusmittaukset energiatehokkaissa rakennuksissa. Diplomityö, Tampereen teknillinen yliopisto, Signaalinkäsittelyn ja tietoliikennetekniikan koulutusohjelma, Tampere, 2014.
- [4] Hentilä, T. Asuinkerrostaloille tyypillisten seinärakenteiden materiaalivaimennukset matalilla 5G-taajuuksilla. Diplomityö, Tampereen teknillinen yliopisto, Sähkötekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma, Tampere, 2018.
- [5] Hytönen, O. Radiosignaalin läpäisyn optimointi lasirakenteissa. Diplomityö, Tampereen teknillinen yliopisto, Sähkötekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma, Tampere, 2018.
- [6] Viitanen, J. Kotitalouksien internet-yhteyksien teknistaloudellinen mallinnus 2015 – 2025. Diplomityö, Aalto-yliopisto, Tietoliikenne- ja tietoverkkotekniikan laitos, Espoo, 2016.
- [7] Liikenne- ja viestintäministeriön työryhmä, pj. Rantala, O. Matkaviestinverkon kuuluvuusongelmat matalaenergia rakennuksissa – Työryhmän raportti. Liikenne- ja viestintäministeriön julkaisuja 26/2013. Verkkodokumentti. 2013.
Viitattu: 28.11.2019. Saatavilla: < <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-243-359-6>>.
- [8] Tefficient. Industry analysis #1/2018, Mobile data – full year 2017. Verkkodokumentti. 2018. Viitattu: 18.12.2019. Saatavilla: <<https://tefficient.com/wp-content/uploads/2018/07/tefficient-industry-analysis-1-2018-mobile-data-usage-and-revenue-FY-2017-per-country-18-July-2018.pdf>>.
- [9] L 917/2014. Tietoyhteiskuntakaari. Annettu: 07.11.2014. Viitattu: 19.12.2019. Saatavilla: <<https://www.finlex.fi/fi/>>, ajantasainen lainsäädäntö.
- [10] A 531/2018. Valtioneuvoston asetus radiotaajuuksien käytöstä ja taajuussuunnitelmasta annetun valtioneuvoston asetuksen muuttamisesta. Annettu: 05.07.2018. Viitattu: 19.12.2019. Saatavilla: <<https://www.finlex.fi/fi/>>, ajantasainen lainsäädäntö.
- [11] Viestintävirasto. Viestintävirasto ei myönnä yksittäisiä lupia matkaviestinverkon toistimille. Verkkodokumentti. Päivitetty: 18.10.2012. Viitattu: 20.12.2019. Saatavilla: <https://legacy.viestintavirasto.fi/viestintavirasto/ajankohtaista/2012/P_119.html>.

- [12] Omnitele. Mobiiliverkkojen tiedonsiirtonopeuksien vertailu 05/2019. Loppuraportti, 21.05.2019. Verkkodokumentti. 2019. Viitattu: 18.12.2019. Saatavilla: <https://www.dna.fi/documents/753910/1424803/Omnitele_BM_2019_Spring.pdf/341e8436-ab3d-0bad-47b3-ba743d4c9dd2?t=1559898287652>.
- [13] Dahlman, E., Mildh, G., Parkvall, S., Peisa, J., Sachs, J., Selén, Y., & Sköld, J. 5G Wireless Access: Requirements and Realization. *IEEE Communications Magazine*, 2014, verkkolehti, vol. 52, nro 12, s. 42-47. Viitattu: 8.11.2019. DOI: 10.1109/MCOM.2014.6979985.
- [14] Inoue, Y., Yoshioka, S., Kishiyama, Y., Kepler, J., Cudak, M., Suyama, S., & Okumura, Y. Field Experimental Trials for 5G Mobile Communication System Using 70 GHz-Band. *2017 IEEE Wireless Communications and Networking Conference Workshops (WCNCW)*, San Francisco, CA, 2017, s. 1-6. DOI: 10.1109/WCNCW.2017.7919092.
- [15] L 379/2011. Pelastuslaki. Annettu: 29.04.2011. Viitattu: 08.11.2019. Saatavilla: <<https://www.finlex.fi/fi/>>, ajantasainen lainsäädäntö.
- [16] Suomen Erillisverkot. Kiinteistöjen virve -kuuluvuuden toteuttaminen. Verkkodokumentti. 2019. Viitattu: 19.12.2019. Saatavilla: <https://www.erillisverkot.fi/files/261/Kiinteistojen_virve_kuuluvuuden_toteuttaminen.pdf>.
- [17] Suomen Erillisverkot. Virve-sisätilaverkon rakentaminen. Verkkodokumentti. 2019. Viitattu: 12.12.2019. Saatavilla: <https://www.erillisverkot.fi/palvelut/tietoliikenne/virve/ohjeita_sisapeiton_rakentamiseen>.
- [18] RT 80-11252. Matkaviestinkuuluvuus rakennuksissa. Helsinki, Rakennustietosäätiö RTS sr, 2017. 8 s.
- [19] Suomen Erillisverkot. Virve-tietoa, Virve fact sheet. Verkkodokumentti. 2019. Viitattu: 19.12.2019. Saatavilla: <https://www.erillisverkot.fi/files/281/Virve_fact_sheet_3_2019_-_Copy.pdf>.
- [20] Liikenne- ja viestintävirasto. Oikeutesi viestinnän peruspalveluihin. Verkkodokumentti. Päivitetty: 08.04.2019. Viitattu: 20.12.2019. Saatavissa: <<https://www.traficom.fi/fi/viestinta/laajakaista-ja-puhelin/oikeutesi-viestinnan-peruspalveluihin>>.
- [21] L 812/2017. Laki maankäyttö- ja rakennuslain muuttamisesta. Annettu: 01.12.2017. Viitattu: 07.11.2019. Saatavilla: <<https://www.finlex.fi/fi/>>, ajantasainen lainsäädäntö.
- [22] UNEP. Building Design and Construction: Forging Resource Efficiency and Sustainable Development. Verkkodokumentti. 2012. Viitattu: 18.12.2019. Saatavilla: <<https://s3.amazonaws.com/legacy.usgbc.org/usgbc/docs/Archive/General/Docs19073.pdf>>.
- [23] Santamouris, M. Innovating to zero the building sector in Europe: Minimising the energy consumption, eradication of the energy poverty and mitigating the local climate change. *Solar Energy*, 2016, Volume 128, verkkolehti, s. 61-94. Viitattu: 20.12.2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.01.021>.

- [24] Sitra, Ympäristöministeriö & Tekes. ERA17 – Energiaviisaan rakennetun ympäristön aika 2017: esite. Verkkodokumentti. 2010. Viitattu: 18.12.2019. Saatavilla: <https://media.sitra.fi/2017/04/03105602/ERA17_esite_suomi.pdf>.
- [25] Reinikainen, E., Loisa, L., & Tyni A. FinZEB-hanke, Loppuraportti, Hankkeen sisältö ja tulokset. Verkkodokumentti. 2015. Viitattu: 18.12.2019. Saatavilla: <https://tem.fi/documents/1410877/2735615/FInZEB_loppuraportti.pdf/6527928a-809b-4870-9e3e-425fe26c15d1/FInZEB_loppuraportti.pdf>.
- [26] Asp, A., Sydorov, Y., Keskikastari, M., & Niemelä, J. Rakennusten sisätiloissa esiintyvien matkapuhelinten kuuluvuusongelmien ratkaisuvaihtoehtojen kartoitus. Tekninen raportti. Tampere: Tampereen teknillinen yliopisto, Tietoliikennetekniikan laitos, 2012. 104 s.
- [27] Kilpeläinen, V. Passiivinen keskeismodulaatio sisätila-radioverkoissa. Diplomityö, Tampereen teknillinen yliopisto, Sähkötekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma, Tampere, 2016.
- [28] Pekonen, J. Radiotie Suomi Oy. Matkaviestinverkot. Luentomateriaali, koulutustilaisuus, 27.09.2019. Rakennusten matkaviestin- ja WLAN-kuuluvuuden kartoitus, mittaus ja suunnittelu, Sähköinfo Oy. Espoo, 2019.
- [29] Stavrou, S., & Saunders, S. R. Factors influencing outdoor to indoor radio wave propagation. *Twelfth International Conference on Antennas and Propagation 2003 (ICAP 2003)*, 2003, verkkolehti, vol. 2, nro 491, s. 581-585. Viitattu 8.11.2019. DOI: 10.1049/cp:20030142.
- [30] Stavrou, S., & Saunders, S. R. Review of constitutive parameters of building materials. *Twelfth International Conference on Antennas and Propagation 2003 (ICAP 2003)*, 2003, verkkolehti, vol. 1, nro 491, s. 211-215. Viitattu 8.11.2019. DOI: 10.1049/cp:20030052.
- [31] Rakennusteollisuus RT ry. Suunnitteluohje. Matkapuhelimien kuuluvuus sisätiloissa – Energiatiedotus uudis- ja korjausrakentaminen. Verkkodokumentti. 2013. Viitattu: 28.11.2019. Saatavilla: <https://www.rakennusteollisuus.fi/globalassets/rakentamisen-kehittaminen/suunnitteluohje_matkapuhelimien_kuuluvuus.pdf>.
- [32] Stone, W. Electromagnetic Signal Attenuation in Construction Materials. NIST Construction Automation Program Report No. 3, NIST Interagency/Internal Report (NISTIR) – 6055. 1997. DOI: 10.6028/NIST.IR.6055.
- [33] Asp, A., Hentilä, T., Valkama, M., Pikkuvirta, J., Hujanen, A., & Huhtinen, I. Impact of Concrete Moisture on Radio Propagation: Fundamentals and Measurements of Concrete Samples, *2019 16th International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS)*, Oulu, Finland, 2019, s. 542-547. DOI: 10.1109/ISWCS.2019.8877182.
- [34] Asp, A. & RSV Measurements Oy. RF-luvun käyttömahdollisuudet rakennusten signaalinvaimennusten arvioinnissa. Esiselvitys. Liikenne- ja viestintäministeriön julkaisuja 27/2013. Verkkodokumentti. 2013. Viitattu: 28.11.2019. Saatavilla: <<http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-243-361-9>>.

- [35] Asp, A., Baniya, A., Yunas, S. F., Niemelä, J., & Valkama, M. Applicability of Frequency Selective Surfaces to Enhance Mobile Network Coverage in Future Energy-Efficient Built Environments. *Proceedings of European Wireless 2015; 21th European Wireless Conference*, Budapest, Hungary, 2015, s. 1-8. ISBN: 978-3-8007-3976-9.
- [36] Kemppainen, J. Asiamies. Rakennusteollisuus RT ry, Keskustoimisto. Eteläranta 10, 00130 Helsinki. Haastateltu 15.11.2019.
- [37] ST 625.10. Matkaviestinjärjestelmien sisäantenniverkot. Suunnitteluohje. Espoo, Sähkötieto ry, 2015. 15 s.
- [38] Liu, Z., Kolding, T., Mogensen, P., Vejgaard, B., & Sorensen, T. Economical Comparison of Enterprise In-building Wireless Solutions using DAS and Femto. *2012 IEEE Vehicular Technology Conference (VTC Fall)*, 2012, verkkolehti, s. 1-5. Viitattu: 8.11.2019. DOI: 10.1109/VTCFall.2012.6399316.
- [39] Asp, A., Yunas, S. F., Kilpeläinen, V., Niemelä, J., & Valkama, M. Passive Intermodulation and Network Planning Challenges in Future Indoor Networks and Energy Efficient Buildings. *European Wireless Conference 2016; 22th European Wireless Conference*, Oulu, Finland, 2016, s. 1-7. ISBN: 978-3-8007-4221-9.
- [40] RT 10-11256. Talonrakennushankkeen kulku, yleistä. Helsinki, Rakennustietosäätiö RTS sr, 2017. 4 s.
- [41] RT 10-11290. Taloteknisen suunnittelun tehtäväluettelo TATE18. Helsinki, Rakennustietosäätiö RTS sr, 2017. 33 s.
- [42] Pekonen, J. Radiotie Suomi Oy. Sisäkuuluvuuden varmistaminen rakennushankkeessa – aikajana. Luentomateriaali, 2016. Viitattu: 17.02.2020.
- [43] Hyvärinen, M., Nikander, P., & Ruusuvuori, J. *Tutkimushaastattelun käsikirja*. Tampere, Kustannusosakeyhtiö Vastapaino, 2017. ISBN: 978-951-768-611-2.
- [44] Niemelä, J., Asp, A., & Sydorov, Y. Radiosignaalin vaimennusmittauksia nykyaikaisissa asuintaloissa. Loppuraportti. Tampere: Tampereen teknillinen yliopisto, Tietoliikennetekniikan laitos, 2012. 61 s. (Tampereen teknillinen yliopisto. Tietoliikennetekniikan laitos. Tutkimusraportti; 1).
- [45] Viestintävirasto 65 D/2019 M. Määräys kiinteistön sisäverkoista ja teleurakoinnista. Annettu: 11.11.2019. Viitattu: 21.02.2020. Saatavilla: <https://www.finlex.fi/data/normit/45569/M_65_D_2019.pdf>.
- [46] Liikenne- ja viestintävirasto 306/2019 S. Kiinteistöjen laittilojen lukitus. Suositus. Annettu: 12.11.2019. Viitattu: 21.02.2020. Saatavilla: <https://www.traficom.fi/sites/default/files/media/regulation/FI_Suositus_306_2019_S.pdf>.

Haastattelut

Teemu Seppänen, Insinööritoimisto Stacon Oy:n osastopäällikkö, tieto- ja turvallisuusjärjestelmien suunnittelu ja konsultointi.

Haastateltu 25.10.2019.

Staconin päätoimialana on talonrakentamisen peruskorjaukseen ja uudistustoimintaan liittyvät sähkö-, tele- ja turvatekniset konsultointi- ja suunnittelutehtävät hankesuunnittelusta rakennuksen käyttöön. Yrityksen palveluihin sisältyy sähkö-, tieto-, AV-, turvallisuus-, valaistus-, paloilmoin- ja varoitinjärjestelmien suunnittelu, energia- ja kuntoselvitykset sekä sähkörakennuttamisen, valvonnan ja käyttöönottokonsultoinnin palvelut.

Pasi Hyyppä, Senaatti-kiinteistöjen talotekniikkaryhmän ryhmäpäällikkö.

Haastateltu 13.11.2019.

Senaatti-kiinteistöt tuottaa tilapalveluja ensisijaisesti valtionhallinnon asiakkaille valtionvarainministeriön alaisuudessa. Asiakkaisiin kuuluvat esimerkiksi valtion virastot, tutkimus- ja kulttuurilaitokset, vankilat ja puolustushallinto.

Jukka Pihonen, Liikenne- ja viestintävirasto Traficomin taajuushallinnon radiotarkastusasiantuntija ja Ritva Suurnäkki, Liikenne- ja viestintävirasto Traficomin taajuushallinnon erityisasiantuntija.

Haastateltu 14.11.2019.

Liikenne- ja viestintävirasto Traficom on palveleva liikenteen ja viestinnän lupa-, rekisteri- ja valvontaviranomainen. Sen päätehtävänä on edistää tietoyhteiskunnan ja liikennejärjestelmän kehittymistä sekä edistää toimivia ja turvallisia liikenne- ja viestintäyhteyksiä sekä viestintäpalveluita. Traficom esimerkiksi valvoo taajuuksien käyttöä ja selvittää radioliikenteen häiriöitä.

Jani Kemppainen, Rakennusteollisuus RT ry:n ja Talonrakennusteollisuus ry:n asiamies.

Haastateltu 15.11.2019.

Rakennusteollisuus RT ry on rakennusalan yritysten elinkeinopoliittisten, teknisten ja työmarkkina-asioiden edunvalvoja. Siihen kuuluvat keskusliitto ja kuusi toimialaa, joista yksi on talonrakennus. Toiminnan lähtökohtana on parantaa rakennusteollisuuden liiketoimintaedellytyksiä sekä rakennetun ympäristön toimivuutta ja laatua.

Mika Toivonen, Telia Finland Oyj:n asiantuntija.

Haastateltu 20.11.2019.

Telia Finland on monikansallisen teleoperaattorin, Telia Company -konsernin Suomen maayhtiö. Telia Finland tarjoaa kiinteän verkon ja mobiiliverkon tietoliikennepalveluita yritys- ja kuluttaja-asiakkaille.

Mikko Yrjönen, Insinööritoimisto Tauno Nissinen Oy:n toimitusjohtaja.
Haastateltu 21.11.2019.

Insinööritoimisto Tauno Nissinen on sähkötekniiseen suunnitteluun keskittynyt toimisto. Sen päätoimialana on tarjota sähkö-, tele-, turva-, valaistus-, energia- ja AV-järjestelmien suunnittelua, asennustöiden valvontaa sekä kuntokartoituksia. Yrityksen toimialan piiriin kuuluvat kaikentyypiset uudis- ja perusparannuskohteet.

Harri Hilden, Suomen Erillisverkot -konsernin radiopalveluiden yksikönpäällikkö.
Haastateltu 22.11.2019.

Suomen Erillisverkot on valtioneuvoston kanslian omistajaohjauksessa toimiva ja valtion omistama erityistehtäväyhtiö. Yksi sen tehtävistä on operoida ja kehittää turvallisuusviranomaisten käyttämää viranomasiradioverkkoa, eli Virveä.

Kimmo Karjalainen, Elisa Oyj, kehityspäällikkö.
Haastateltu 04.12.2019.

Elisa on suomalainen operaattori, joka tarjoaa kiinteän ja mobiiliverkon palveluita yksityis- ja yritysasiakkaille. Yhtiö tarjoaa myös digitaalisia palveluita kotimaassa ja kansainvälisillä markkinoilla.

Markku Valkealahti, Fitelnet Oy:n toimitusjohtaja.
Haastateltu 17.12.2019.

Fitelnet Oy on erikoistunut radio- ja televerkkojen suunnitteluun ja rakentamiseen, EMP/HPM-suojaukseen ja kriittisten tilojen sähkönsyötön varmentamiseen. Fitelnet toteuttaa sisätilojen radioverkot kokonaisuudessaan, eli suunnittelusta urakointiin ja käyttöönottoon.

Liite 1

Haastattelurunko

Tässä liitteessä on esitetty pääpiirteittäin diplomityötä varten haastattelututkimuksessa käytetty haastattelurunko. Haastattelurunko on jaettu pää- ja lisäkysymyksiin. Pääkysymykset esitettiin kaikille haastateltaville ja niitä täydennettiin tarvittaessa lisäkysymyksillä haastateltavien antamien vastausten sekä haastattelun etenemisen ja ajankäytön perusteella.

Pääkysymykset:

1. Haastateltavan tiedot ja nauhoituslupa
2. Haastateltavan kokemat ongelmat sisäkuuluvuusasioissa
3. Vastuu sisäkuuluvuudesta
4. Sähkösuunnittelijan vastuu ja hyvien suunnitelmien sisältö
5. Miten tilannetta voisi edistää, miten hankkeen tulisi edetä sisäkuuluvuuden kannalta?
6. Mitä eri haasteita uudis- ja korjausrakentaminen tuovat sisäkuuluvuuteen?
7. Laite- ja tilavaraukset, huollettavuus
8. Voice over Wi-Fi -verkon hyödyntäminen
9. Muuta, haastateltavan esille tuomat asiat

Lisäkysymykset:

10. Tulisiko sisäantenniverkko toteuttaa aina uusiin rakennuksiin?
11. Haastateltavan 5G-näkemykset, ongelmat ja ratkaisut
12. Tulevatko pico- ja femtotukiasemat mahdollisesti yleistymään 5G:n myötä?
13. Operaattorien liittyminen sisäantenniverkkoihin